



HAL
open science

Prise en compte de l'incertain dans le dimensionnement des ouvrages de génie civil, conciliant sécurité et économie

Jean-Bernard Kovarik

► **To cite this version:**

Jean-Bernard Kovarik. Prise en compte de l'incertain dans le dimensionnement des ouvrages de génie civil, conciliant sécurité et économie. Génie civil. Université Paris-Est, 2024. Français. NNT : 2024PESC2003 . tel-04566065

HAL Id: tel-04566065

<https://theses.hal.science/tel-04566065v1>

Submitted on 2 May 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université Paris-Est
(COMUE Paris Est Sup)

U.F.R. : Sciences

École doctorale : Sciences, Ingénierie, Environnement (SIE)

Mémoire de doctorat

présenté par

Jean-Bernard KOVARIK

soutenu le 9 janvier 2024

en vue de l'obtention du diplôme de Docteur de l'université Paris-Est

par la validation des acquis de l'expérience (VAE)

dans la spécialité : Génie Civil

(article L335-5 du code de l'éducation)

**Prise en compte de l'incertain dans le dimensionnement des ouvrages de génie civil,
conciliant sécurité et économie**

Jury :

Xavier CHATEAU, Directeur de Recherche, CNRS	Président
Anne PANTET, Professeure des Universités, Université du Havre	Rapporteure
Jean-Michel HIVER, Professeur des Universités, Université Libre de Bruxelles	Rapporteur
Catherine JACQUARD, Docteure, directrice technique de Fondasol	Rapporteure
Lydie PHAM, Maîtresse de conférences, Université Paris-Est	Membre permanent
Philippe REIFFSTECK, Directeur de Recherche, Université Gustave Eiffel	Encadrant
Laurent GAUTRON, Professeur des Universités, Vice-président Recherche adjoint politique doctorale, Université Gustave Eiffel	Accompagnateur VAE

Table des matières

Remerciements	iv
Sigles.....	v
Glossaire.....	ix
Liste des figures.....	xi
Liste des tableaux.....	xiii
Liste des photos.....	xiv
Résumé.....	xv
Extended abstract	xvii
Mots-clé.....	xx
Key words	xx
Enjeux et motivations.....	1
Partie 1. Parcours professionnel et personnel.....	5
1.1. Approche de la sécurité des ouvrages portuaires avec les Eurocodes (1993-2000).....	5
1.1.1 Politique économique et politique de sécurité dans les Eurocodes	6
1.1.2 Nécessaire adaptation du format de sécurité.....	8
1.1.3 Situations de projet	8
1.1.4 Valeurs caractéristiques des actions variables portuaires	9
1.1.5 Combinaisons d’actions.....	11
1.1.6 Etats-limites.....	13
1.1.7 Coefficients de sécurité.....	15
1.1.8 Publications	16
1.2. Etude des barrages de navigation et des barrages de retenue (1996–2006).....	16
1.2.1 Barrages de navigation	16
1.2.2 Barrages de retenue	19
1.3. Croisement des approches de l’incertain avec le calcul socio-économique (2008-2011)	22
1.3.1 Analyse socio-économique des projets.....	22
1.3.2 Distinction entre risque et incertitude	24
1.3.3 Analyse des risques et notion de risque admissible.....	25
1.4. Elargissement des Eurocodes aux ouvrages côtiers (depuis 2018).....	28
1.4.1 Faire le pont entre deux univers scientifiques : Eurocodes et calcul hydraulique.....	28
1.4.2 Valorisation dans l’univers des normes.....	29
1.5. Enseignement et animation scientifique (depuis 2001).....	30
1.5.1 Interventions régulières en université et école d’ingénieurs.....	30

1.5.2	Pilotage et gouvernance scientifique	32
1.6.	Bilan et perspectives vers de futurs travaux	33
1.6.1	Forces	33
1.6.2	Faiblesses.....	33
1.6.3	Menaces	34
1.6.4	Opportunités	35
Partie 2. Aptitudes et capacités développées dans les activités de recherche, de valorisation et d'encadrement.....		37
2.1.	Faire le point sur l'état des connaissances.....	37
2.1.1	Différentes approches de la sécurité	37
2.1.2	Méthodes de calage des coefficients de sécurité	39
2.1.3	Sécurité des barrages de retenue	41
2.1.4	Débats et controverses sur les approches de la sécurité.....	42
2.2.	Conception et mise en œuvre de démarches de recherche	45
2.2.1	Caractérisation de la résistance des palplanches de raccord dans les gabionnades	45
2.2.2	Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés des sols.....	48
2.2.3	Elaboration d'un format de vérification semi-probabiliste pour le dimensionnement des digues verticales	53
2.2.4	Etude d'un format de sécurité semi-probabiliste pour les ouvrages côtiers.....	58
2.2.5	Analyse des coefficients de modèle pour les états-limites des ouvrages portuaires ...	67
2.2.6	Analyse des coefficients de modèle pour les états-limites des barrages de navigation	76
2.2.7	Etude probabiliste du coefficient de modèle pour l'état-limite de défaut de capacité portante d'un pieu isolé sous charge axiale.....	78
2.3.	Encadrement d'équipe et activités scientifiques	83
2.3.1	Recherche et management	83
2.3.2	Gouvernance scientifique.....	85
2.4.	Questionnements éthiques dans la conduite et la valorisation des travaux scientifiques...	87
2.4.1	Communication et confidentialité.....	87
2.4.2	Travaux collaboratifs et propriété intellectuelle.....	89
2.4.3	Dilemme coût/sécurité.....	90
2.5.	Formation et transfert de connaissances.....	90
2.5.1	Enrichissement et actualisation des supports pédagogiques	90
2.5.2	Importance des mots et des expressions employées	91
2.5.3	Application sur le terrain.....	93
2.6.	Construction et mobilisation d'un réseau national et international.....	96

2.6.1	AIPCN/PIANC	96
2.6.2	Génie portuaire et côtier	97
Partie 3.	Synthèse des acquis de l'expérience	98
3.1	Acquisition des compétences doctorales.....	98
3.2	Où en est-on dans la prise en compte de l'incertain dans le dimensionnement des ouvrages de génie civil ?	100
Références.....		104
Littérature scientifique.....		104
Articles.....		104
Proceedings, Conférences		105
Ouvrages.....		105
Thèses.....		106
Littérature professionnelle ou appliquée.....		107
Normes et Documents techniques unifiés		107
Règlements français		107
Codes de calcul étrangers.....		108
Rapports		108
Annexe A	CV en frise chronologique	110
Annexe B	Tableau d'analyse des compétences doctorales.....	112
Annexe C	Encadrements.....	114
Annexe D	Enseignements	116
Annexe E	Production scientifique	117
Ouvrages collectifs		117
Articles dans des revues à comité de lecture.....		117
Communications dans des colloques		118
Policy briefs		119
Articles dans des revues sans comité de lecture.....		119
Articles dans les revues professionnelles et autres productions		119
Normes, textes réglementaires, rapports reprenant des éléments issus de mes travaux de recherche		120
Annexe F	Participation à des jurys de thèse	121
Annexe G	Conférence invitée	121
Annexe H	Arrêté du 22 février 209 définissant les compétences des diplômés du doctorat	122
Annexe I	Référentiel compétences des études doctorales de l'Université Paris-Est (Paris-Est Sup)	124

Remerciements

J'exprime ma plus vive gratitude à Jean-Armand Calgaro (SETRA), Pierre Monadier (STCPMVN) et Jean-Pierre Magnan (LCPC) qui m'ont introduit dans l'univers des Eurocodes et ont été les inspirateurs de ces travaux, ainsi qu'à la bienveillance et l'immense personnalité Jean Chapon qui m'a encouragé à poursuivre cette démarche scientifique dans la durée.

Il n'est pas possible de remercier toutes celles et ceux qui ont contribué aux recherches présentées dans ce mémoire. Je souhaite néanmoins faire figurer ici les noms (par ordre alphabétique) de William Allsop (HR Wallingford, Royaume-Uni), Francois Baguelin (Fondaconcept), Luc Baumstarck (université de Lyon), Daniel Boissier (université de Clermont-Ferrand), Patrick de Buhan (ENPC), Michel Belorgey (université de Caen), Basile Bonnemaire (Leroy Seafood Group), Hans Burcharth (université d'Aalborg, Danemark), Alain Corfdir (ENPC/CERCSO), Fabrice Daly (Cerema), Jean-Louis Favre (Ecole centrale de Paris), Roger Frank (ENPC/CERMES), Christian Gollier (Toulouse School of Economics), Luc Hamm (Artelia), André Isnard (Bureau Veritas), Bernard Jacob (LCPC, université Gustave Eiffel), Manuel Le Moine (Cetmef, Cerema), Daniel Levacher (université de Nantes), Jean-Marc Locci (Bureau Veritas), Michel Massoni (CGEDD, IGEDD), Franck Mazas (Artelia), Hocine Oumeraci (université de Braunschweig, Allemagne), Olivier Piet (STCPMVN, Cerema), Laurent Peyras (Cemagref, Inrae), François Ropert (STCPMVN, Cerema), Paul Royet (Cemagref, Inrae), Jean Salençon (Ecole polytechnique/LMS), René Salgues (ProfilArbed), François Schlosser (Terrasol), Alex Schmitt (ProfilArbed), Jan Vrijling (université de Delft, Pays-Bas).

Je remercie très chaleureusement René Genevois (Port autonome de Rouen), Geoffroy Caude (Cetmef, AIPCN), Daniel Bursaux et Laurent Tapadinhas (DGITM), Hélène Jacquot-Guimbal (Ifsttar) et Gilles Roussel (université Gustave Eiffel) pour le soutien qu'ils ont apporté à mes activités scientifiques effectuées en parallèle de responsabilités opérationnelles au cours de mes différentes affectations.

Je remercie tout particulièrement mon encadrant doctoral, Philippe Reiffsteck, directeur de recherche, directeur du laboratoire Sols, Roches et Ouvrages (SRO), département Géotechnique, Environnement, Risques naturels et Sciences de la terre (GERS) de l'université Gustave Eiffel, et mon accompagnateur VAE, Laurent Gautron, professeur des universités, Vice-président Recherche adjoint chargé de la politique doctorale, laboratoire Géomatériaux et environnement (LGE) de l'université Gustave Eiffel.

Sigles

ACI	<i>American Concrete Institute</i>
AFNOR	Association française de normalisation
AIPCN	voir PIANC
AIPCR	Voir PIARC
BAEL	Béton armé aux états-limites
CC	Classe de conséquences
CCTP	Cahier des clauses techniques particulières
CEB	Comité européen du béton
CEI	Commission d'évaluation des ingénieurs (concerne INRAe)
CEMAGREF	Centre d'étude du machinisme agricole et du génie rural des eaux et forêts
CEN	Comité européen de normalisation
CENELEC	Comité européen de normalisation en électronique et électrotechnique
CERAS	Centre d'enseignement et de recherche en analyse socio-économique
CERCOS	Centre d'enseignement et de recherche en calcul des structures et des ouvrages
CEREMA	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CERMICS	Centre d'enseignement et de recherche en mathématiques et calcul scientifique
CETMEF	Centre d'études techniques maritimes et fluviales
CETu	Centre d'étude des tunnels
CFBR	Comité français des barrages-réservoirs
CFGB	Comité français des grands barrages
CM	Construction métallique
CME	Cote maximale d'exploitation
CNAM	Conservatoire national des arts et métiers
COMUE	Communauté d'universités et d'établissements
CWA	<i>CEN Workshop Agreement</i>
DDE	Direction départementale de l'équipement

DESS	Diplôme d'études supérieures spécialisées
DGITM	Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer
DTU	Document technique unifié
DUP	Durée d'utilisation de projet
EAU	<i>Empfehlungen des Arbeitsausschusses « Ufereinfassungen »</i>
ELF	Etat-limite fonctionnel
ELS	Etat-limite de service
ELU	Etat-limite ultime
EMGCU	Expérimentation et modélisation pour le génie civil et urbain
EN	Norme européenne
ENPC	Ecole nationale des ponts et chaussées
ENV	Norme européenne volontaire
EPST	Etablissement scientifique à caractère scientifique et technologique
EQU	Etat-limite d'équilibre statique
ESR	Enseignement supérieur et recherche
ETSI	<i>European Telecommunication Standard Institute</i>
FAT	Etat-limite de fatigue
FEHRL	<i>Forum of European National Highway Research Laboratories</i>
FFOM	Forces, faiblesses, opportunités, menaces
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FNTF	Fédération nationale des travaux publics
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GEO	Etat-limite géotechnique
GERS	Géotechnique, environnement, risques naturels et sciences de la terre
HYD	Etat-limite hydraulique
IDRRIM	Institut des routes, des rues et des infrastructures de mobilité
ICASP	<i>International Conference On Application Of Statistics And Probability In Civil Engineering</i>

ICE	<i>Institution of Civil Engineers</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IFSA	Institut francilien des sciences appliquées
IFSTTAR	Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux
INRAe	Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
INSA	Institut national des sciences appliquées
IREX	Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil
IRT	Institut de recherche technologique
ISO	Organisation internationale de normalisation
ITE	Institut de transition énergétique
ITS	<i>Intelligent Transport Services and Systems</i>
JNF	Journées nationales de fiabilité
LC	<i>Load Case</i>
LCPC	Laboratoire central des ponts et chaussées
LNH	Laboratoire national d'hydraulique
LRFD	<i>Load and Resistance Factor Design</i>
LRPC	Laboratoire régional des ponts et chaussées
MAST	Matériaux et structures
MAST	<i>Marine And Science Technology</i>
NWIP	<i>New Work Item Programme</i>
PAS	<i>Publicly Available Specification</i>
PHE	Plus hautes eaux
PIANC	<i>World Association for Waterborne Transport Infrastructure</i>
PIARC	<i>World Road Congress</i>
PROVERBS	<i>Probabilistic Design Tools of Vertical Breakwaters</i>
RCP	<i>Recommended Concentration Pathway</i>
RIM	Rencontres de l'ingénierie maritime

RN	Retenue normale
ROM	<i>Recomendaciones para obras maritimas</i>
ROSA	Recommandations pour le calcul aux états-limites des ouvrages en site aquatique
RST	Réseau scientifique et technique
SHOM	Service hydrographique et océanographique de la Marine
SHS	Sciences humaines et sociales
SRO	Sols, roches et ouvrages
STCPMVN	Service technique central des ports maritimes et des voies navigables
SWOT	<i>Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats</i>
TA	Tirants d’ancrage
TRA	<i>Transport Resaerch Arena</i>
TRAMAF	Syndicat des entreprises des travaux maritimes et fluviaux
TSE	<i>Toulouse School of Economics</i>
STR	État-limite structural
UGE	Université Gustave Eiffel
UPL	Etat-limite de soulèvement
VAE	Validation des acquis de l’expérience
VAN	Valeur actualisée nette
WG	<i>Working Group</i>
WSD	<i>Working Stress Design</i>

Glossaire

Aléa	<ul style="list-style-type: none">- Dans le langage courant, désigne un événement imprévisible (dictionnaire Le Robert).- En analyse de risques, désigne la fréquence (ou la probabilité) d'occurrence d'un événement non souhaité pendant une certaine période de référence.
Coefficient de modèle	<ul style="list-style-type: none">- Nombre sans dimension introduit à un endroit donné dans les calculs de dimensionnement ou de vérification d'un ouvrage afin de prévenir une déviation dans le sens défavorable des résultats de la modélisation du comportement de l'ouvrage (coefficient de modèle d'action, coefficient de modèle de résistance, coefficient de modèle de vieillissement, etc.).
Coefficient de sécurité	<ul style="list-style-type: none">- Nombre sans dimension introduit à un endroit donné dans les calculs de dimensionnement ou de vérification d'un ouvrage afin de prévenir une déviation dans le sens défavorable : de la valeur d'un ou de plusieurs paramètres intervenant dans le calcul (coefficient de sécurité de valeur) ; ou de la modélisation du comportement de l'ouvrage ou de son environnement, par rapport à la réalité (coefficient de sécurité de modèle).- Nombre sans dimension caractérisant le niveau de sécurité exhibé par un ouvrage de dimensions connues au regard d'un état-limite donné (ex : coefficient de sécurité au glissement).
Critère de performance	<ul style="list-style-type: none">- Condition de toute nature qu'un projeteur, par son travail de conception et de dimensionnement, doit assurer qu'une structure remplira sur toute sa durée d'utilisation de projet. Les états-limites sont des critères de performance particuliers relatifs à la solidité, à la tenue dans le temps, à l'aptitude à l'usage d'une structure.
Etat-limite	<ul style="list-style-type: none">- Etat d'une structure au-delà de laquelle celle-ci ne satisfait plus les critères de performance pertinents posés pour sa conception (NF EN 1990).
Eurocode	<ul style="list-style-type: none">- Ensemble cohérent de normes européennes, d'application volontaire, se substituant aux codes nationaux, harmonisant les méthodes de calcul utilisables pour vérifier la stabilité et le dimensionnement des différents éléments constituant les bâtiments ou ouvrages de génie civil (https://normalisation.afnor.org/thematiques/eurocodes/).
Incertain	<ul style="list-style-type: none">- Qui n'est pas fixé d'avance, qui n'est pas connu avec certitude, dont la forme, la nature n'est pas nette (dictionnaire le Robert).
Indice de fiabilité	<ul style="list-style-type: none">- Nombre sans dimension variant dans le sens inverse de la probabilité d'occurrence (probabilité de ruine) d'un état-limite donné d'une

structure. La fonction de répartition de la loi normale centrée réduite calculée à la valeur de l'indice de fiabilité est égale à 1 moins la probabilité de ruine.

- (indice de fiabilité β de Hasofer-Lind) Distance à l'origine de la surface séparant les domaines de stabilité et de ruine (surface d'état-limite), dans l'espace des variables aléatoires indépendantes (obtenu par la transformation de Rosenblatt) et normées (ramenées à des variables gaussiennes centrées réduites) (Calgaro, 2016).

- Un indice de fiabilité global d'une structure assujettie à respecter plusieurs états-limites peut être défini quand on a décrit la combinaison des états-limites, en chaîne ou en série, dont la survenance conduit à la ruine globale de la structure.

Mécanisme de ruine	- Enchaînement des états physiques et géométriques par lesquels passent les éléments d'une structure jusqu'à la survenance d'un état-limite, en conséquence de défauts de résistance aux charges appliquées ou de déformations excessives.
Probabilité de défaillance	- (ou probabilité de ruine) Probabilité de survenance de la défaillance en question (état-limite) pendant une période de temps donnée (en général, 1 an, 50 ans, ou la durée d'utilisation de projet).
Risque	- Effet des incertitudes sur l'atteinte des objectifs (ISO 13000). - Terme polysémique désignant à la fois la possibilité d'un danger et les conséquences potentielles occasionnées par une exposition à un danger (https://www.ineris.fr/fr/risques/est-risque/comment-definir-risque)
Sûreté de fonctionnement	- Aptitude à fonctionner quand, et tel que requis. La sûreté de fonctionnement comprend la disponibilité, la fiabilité, la récupérabilité, la maintenabilité, l'efficacité de la logistique de maintenance et, dans certains cas, d'autres caractéristiques telles que la durabilité, la sûreté et la sécurité (https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=192-01-22).
Vulnérabilité	- Dans le langage courant, désigne le caractère de ce qui peut être blessé, frappé par un mal physique, ou au figuré, qui peut être facilement atteint (dictionnaire le Robert). - En analyse de risques, désigne les conséquences de la survenance d'un événement non souhaité, généralement quantifiées en termes de blessés, de décès, de pertes financières, etc.

Liste des figures

Figure 1	Vue en plan du poste n°4 pour <i>car ferries</i> , port de Cherbourg.....	2
Figure 2	Diagramme des vérifications des ouvrages en site aquatique selon les Eurocodes.....	9
Figure 3	Etats-limites et diagramme de Farmer.....	26
Figure 4	Modèle global de la gabionnade et schématisation des pressions dans les cellules.....	47
Figure 5	Valeur moyenne inférieure d'une propriété de sol.....	50
Figure 6	Valeur basse d'une propriété de sol.....	50
Figure 7	Valeur caractéristique d'une propriété de sol.....	50
Figure 8	Droites représentatives d'une propriété géotechnique variant avec la profondeur sous hypothèse de constance de l'écart-type.....	51
Figure 9	Droites représentatives d'une propriété géotechnique sous hypothèse de croissance linéaire de l'écart-type avec la profondeur.....	52
Figure 10	Droites représentatives d'une propriété géotechnique sous hypothèse de croissance linéaire de l'écart-type avec la profondeur et d'une valeur nulle au niveau du terrain naturel.....	52
Figure 11	Problématique de dimensionnement d'une digue verticale dans le projet PROVERBS.....	55
Figure 12	Comparaison des indices de fiabilité cibles sur 1 an des états-limites de service des digues maritimes selon différentes sources.....	61
Figure 13	Comparaison des indices de fiabilité cibles sur 1 an des états-limites ultimes des digues maritimes selon différentes sources.....	62
Figure 14	Coupe schématique de l'ouvrage de soutènement étudié pour caler les coefficients de modèle	72
Figure 15	Evolution des coûts des ouvrages de soutènement en palplanches selon les itérations sur les coefficients de modèle, méthode du coefficient de réaction.....	73
Figure 16	Evolution des fiches des rideaux de palplanches selon les itérations sur les coefficients de modèle, méthode du coefficient de réaction.....	73
Figure 17	Evolution des types de palplanches (modules) selon les itérations sur les coefficients de modèle, méthode du coefficient de réaction.....	74
Figure 18	Evolution des diamètres des tirants selon les itérations sur les coefficients de modèle, méthode du coefficient de réaction.....	74

Figure 19	Facteurs de dimensionnement au sens, du niveau de sécurité traditionnel, des ouvrages dimensionnés avec la dernière itération des coefficients de modèle (selon trois états-limites en abscisse), méthode du coefficient de réaction.....	75
Figure 20	Coupe schématique d'un barrage mobile	77
Figure 21	Coupe du 3 ^e quai en Seine à Honfleur, solution de base.....	94

Liste des tableaux

Tableau 1	Combinaisons types d'actions.....	12
Tableau 2	Combinaisons types d'actions à utiliser selon la catégorie de l'état-limite et la situation de projet.....	14
Tableau 3	Périodes de retour de la crue exceptionnelle correspondant à la cote des PHE (en années) pour les barrages créés et les barrages de classes A et B reconstruits.....	21
Tableau 4	Probabilité d'occurrence annuelle de la crue extrême correspondant à la cote de danger pour les barrages créés et les barrages de classes A et B reconstruits.....	21
Tableau 5	Appréciation de degré de dépendance des paramètres météocéaniques selon la valeur du paramètre (m) de la copule de Gumbel-Hougaard.....	64
Tableau 6	Valeurs du paramètre (m) de la copule de Gumbel-Hougaard considérées pour les périodes de retour de combinaison.....	64
Tableau 7	Périodes de retour marginales caractéristiques et de combinaison et périodes de retour jointes dans le projet d'EN 1991-1-8.....	65
Tableau 8	Périodes de retour marginales de calcul et de combinaison et périodes de retour jointes dans le projet d'EN 1991-1-8.....	66
Tableau 9	Coefficients de modèle pour les états-limites des barrages de navigation.....	78
Tableau 10	Proposition de coefficient de modèle de résistance pour ajuster à $\beta = 3,0$ les niveaux de sécurité de l'EN 1997-1 dans les combinaisons fondamentales, prenant en compte l'information supplémentaire sur l'erreur de modèle des essais de sol, pour la résistance en capacité portante d'un pieu chargé verticalement.....	83

Liste des photos

Photo 1	Poste n°4 pour <i>car ferries</i> , port de Cherbourg, Manche.....	3
Photo 2	Basculement des quais-caissons du port de Kobe, Japon, 17 janvier 1995.....	6
Photo 3	Navire amarré à Port 2000 avec le système ShoreTension©, port du Havre (Haropa), Seine-Maritime.....	10
Photo 4	Etat-limite ultime d'un soutènement de berge en Seine à Honfleur, Calvados.....	15
Photo 5	Exploitation du barrage à aiguilles de Larçay, Indre-et-Loire.....	17
Photo 6	Portes coulissantes des nouvelles écluses du canal de Panama.....	19
Photo 7	Barrage de Serre-Ponçon, Hautes-Alpes.....	20
Photo 8	Gabionnade en construction sur le port militaire de Brest, Finistère.....	45
Photo 9	Sondage géotechnique.....	49
Photo 10	Construction d'une digue verticale en caissons au port de Tarragone, Espagne.....	54
Photo 11	Désordres de la protection du musoir de l'épi « Arrêt de sable », port de Cotonou, Bénin.....	59
Photo 12	Quai « Port 2000 » pour l'accueil de navires porte-conteneurs, Le Havre (Haropa), Seine-Maritime.....	68
Photo 13	Barrage mobile à clapets de Varennes-sur-Seine, Seine-et-Marne.....	76
Photo 14	Pieux supportant la dalle du 3 ^e Quai en Seine du port d'Honfleur (Haropa), Calvados..	79
Photo 15	Collision contre le pont Jin Tang, Ningbo, Chine, le 27 mars 2008.....	88
Photo 16	<i>Quel est le « coefficient de sécurité » du talus ?</i> Rupture de talus de la LGV Est à Ingenheim, Bas-Rhin, ayant entraîné un déraillement le 5 mars 2020.....	92
Photo 17	Construction du 3 ^e Quai en Seine du port d'Honfleur (Haropa), Calvados.....	95

Résumé

Ce mémoire présente mes principaux domaines d'activités scientifiques ainsi que quelques-uns des résultats obtenus. Il vise à évaluer l'atteinte des compétences doctorales, au sens de l'arrêté du 22 février 2019 définissant les compétences des diplômés du doctorat.

Le fil conducteur est le développement des formats de sécurité aptes à prendre en compte l'incertain, en ce qui concerne plus particulièrement les actions, les propriétés des matériaux et le comportement des structures, afin de dimensionner en bonne sécurité les ouvrages de génie civil tout en respectant l'équilibre économique du secteur de la construction. Le format semi-probabiliste aux états-limites des Eurocodes est la base de départ. J'explique comment depuis une trentaine d'années, adossé à une communauté scientifique internationale, je cherche à l'adapter et à l'appliquer à divers types d'ouvrages en site aquatique (quais, barrages, digues...) et aux actions qu'ils subissent spécifiquement (houle et actions du milieu marin, efforts dus aux navires, charges d'exploitation portuaire). Je situe ce format semi-probabiliste à côté des autres méthodes (probabilistes, déterministes, socio-économiques), et j'expose les différentes natures de coefficients de sécurité qui en sont issues. Je replace le format des Eurocodes dans le cadre plus large des analyses de risques : ceci lui donne un sens assez original et manifeste une puissante efficacité pédagogique. La discussion sur la notion de risque admissible et les différentes approches par lesquelles se construit le consensus autour de celui-ci est croisée avec une présentation plus détaillée des méthodes de calage des coefficients partiels que j'ai mises au point et appliquées pour les quais, les barrages et les digues, toujours en recherchant un rapport équilibré entre sécurité et économie. Je relate à ce propos comment mon regard sur la prise en compte de l'incertain a été renouvelé par une réflexion collective sur les risques et incertitudes dans l'analyse économique coûts-avantages des projets publics d'investissement. Ma participation à l'enseignement, à l'animation scientifique, à l'effort de normalisation, illustre, prolonge et valorise ces travaux académiques.

En particulier, j'expose les travaux qui ont permis de bâtir une méthode issue de la théorie statistique pour la détermination des valeurs caractéristiques des propriétés des sols et ceux qui ont complété une lacune dans la connaissance du comportement mécanique des gabions de palplanches. Je relate comment en utilisant les souplesses du format européen ont été définis les états-limites des ouvrages soumis aux actions hydrauliques (digues, barrages). Je rends compte du travail collaboratif que j'ai dirigé pour déterminer les coefficients de sécurité des quais et des barrages mobiles en rivière compatibles avec le format des Eurocodes ; et en particulier comment plusieurs coefficients de modèle (sur les actions et sur les résistances) ont été calés de manière à ce que les dimensionnements qui en résultent restent proches des dimensionnements antérieurs donnant satisfaction, tout en standardisant et homogénéisant les approches de calcul. J'indique également comment l'on a utilisé le concept mathématique puissant de période de retour pour définir directement la valeur de calcul de l'action de la houle sans passer par l'application d'un coefficient partiel à la valeur caractéristique.

Des perspectives d'évolution consistent essentiellement à adapter les outils de prise en compte de l'incertain, comme les valeurs caractéristiques, les coefficients de sécurité partiels, les indices de fiabilité (ou probabilités de ruine), les situations de projet accidentelles ou extrêmes, pour prendre en compte le dérèglement climatique. La non-stationnarité des lois de probabilité décrivant les phénomènes naturels (glissement des espérances, augmentation des variances) ne peut plus être négligée. L'enjeu est de pouvoir faire des projections sur l'avenir à partir de données récentes et peu

nombreuses et de recalculer les prévisions quasiment « en temps réel ». Il s'agit également de passer de la construction neuve à la maintenance, la réparation et l'analyse de capacité des ouvrages existants, en prenant en compte les incertitudes sur la connaissance des chargements passés et sur les capacités résiduelles de résistance. La meilleure compréhension des phénomènes de vieillissement est en effet de nature à remettre en question les conditions classiques d'état-limite en « tout ou rien ». Il y aura probablement lieu de les réviser pour y insérer à la fois le vieillissement d'usage (la réduction de la résistance dépend des charges appliquées) et le vieillissement lié au temps (indépendant de l'historique de chargement).

Dans le contexte actuel de transition climatique et de la nécessité d'économiser les prélèvements des ressources naturelles, la prise en compte de l'incertain dans le génie civil va conduire à aborder d'autres formes d'incertitudes plus radicales, peu ou pas probabilisables, sur l'environnement et les fonctions des ouvrages de génie civil. Dès lors l'exigence de robustesse des Eurocodes devrait être complétée par une nouvelle exigence, plus vaste, de résilience.

Extended abstract

This dissertation presents my main areas of scientific activity and some of the results obtained. Its aim is to evaluate the achievement of doctoral competencies, as defined by the Decree of the French Government of February 22, 2019, which defines the competencies of doctoral graduates.

The guiding principle is the development of safety formats capable of taking into account uncertainties, particularly with regard to actions, material properties and structural behavior, in order to safely design civil engineering structures while respecting the economic balance of the construction sector. The « semi-probabilistic & limit-states » format of the Eurocodes is the starting point. I explain how for more than a quarter of a century, with the support of an international scientific community, I have been seeking to adapt and apply this format to various types of waterfront structures (quays, dams, breakwaters, etc.) and the actions they are specifically subject to (swell and actions of the marine environment, forces due to ships, port operating loads). I situate this semi-probabilistic format alongside other methods (probabilistic, deterministic, socio-economic), and explain the different types of safety coefficients derived from it. I place the Eurocodes format within the broader framework of risk analysis: this gives it a rather original meaning and demonstrates its powerful pedagogical effectiveness. The discussion on the notion of admissible risk and the different approaches used to build consensus around it is intersected with a more detailed presentation of the partial coefficient calibration methods I have developed and applied for quays, dams and breakwaters, always seeking a balanced relationship between safety and economy. My approach to taking uncertainties into account has been renewed by a collective reflection on risks and uncertainties in the economic cost-benefit analysis of public investment projects. My involvement in teaching, scientific leadership and standardization efforts illustrates, extends and enhances this academic work.

I describe the work that led to the development of a method based on statistical theory for determining the characteristic values of soil properties, and the work that filled a gap in the knowledge of the mechanical behavior of sheet-pile cofferdams. I describe how the flexibility of the European format was used to define the limit states of structures subjected to hydraulic action (breakwaters, dams). I report on the collaborative work I led to determine safety coefficients for port structures and movable river dams compatible with the Eurocodes format; and in particular how several partial model coefficients (on actions and resistances) were calculated in such a way as to keep the resulting designs close to previous satisfactory designs, while standardizing and homogenizing calculation approaches. I show how the powerful mathematical concept of the « return period » was used to directly define the design value for wave action, without having to apply a partial coefficient to the characteristic value.

The initial desire for rationality and convergence towards common optimum safety levels for the design of civil engineering works, came up against the economic reality of the construction sector. This means that, far from being based on target probabilities of failure and on probabilistic studies to calibrate partial factors, the values of the partial factors were determined primarily to preserve the existing economic environment of the structures (i.e. the quantities of materials required, and hence the costs). As long as the traditional design levels recognized by construction companies, owners and contractors, reflect acceptable levels of risk from a socio-political point of view, this approach is not illegitimate.

The outlook for future developments essentially consists in adapting the tools for taking uncertainties into account, such as characteristic values, partial safety coefficients, reliability indices (or probabilities of failure), accidental or extreme project situations, in order to face climate change. The non-stationarity of probability distributions describing natural phenomena (shifting average values, increasing variances) can no longer be overlooked. The challenge is to be able to project the future on the basis of recent and limited data, and to recalibrate forecasts almost "in real time". It also means moving on from new construction to the maintenance, repair and capacity analysis of existing structures, allowing for uncertainties in past loads and residual resistance capacities. A better understanding of ageing phenomena is likely to call into question the conventional "all-or-nothing" limit-state conditions. It will probably be necessary to revise them and include both ageing due to usage (the reduction in strength depends on the loads applied) and ageing due to time (independent of loading history).

I would like to highlight three main issues: (i) with the rate of infrastructure investment having reached a good level overall, we now need to harmonize methods for assessing the structural condition and recalculating existing structures: design and dimension reinforcements to extend the service life of the structure (if not demolish it and rebuild a new one), and/or adapt operating rules (admissible loads) following the weakening of the structure - whose deterioration may have been stopped; (ii) we also need to revise calculation assumptions to take account of climate change: the increasing frequency of high temperatures and the resulting stress on foundation materials and soils, depending on their nature; changes in wind, swell and sea level regimes, and in river flows in different parts of the country, including overseas territories, etc. ; (iii) finally, the introduction of new construction materials (wood, raw earth, composite materials, low-carbon concrete, hemp concrete, bio-sourced binders, etc.) and recycled materials (aggregates from demolition concrete, asphalt pavement aggregates, etc.) requires a better understanding not only of their mechanical behavior and physico-chemical resistance over time, but also of the specific uncertainties associated with them.

The "semi-probabilistic" method of taking account of uncertainty in Eurocodes in which safety coefficients are imposed, could gradually be replaced by a new method based on risk analysis (Risk Informed Decision Making), as authorized in the draft revision of Eurocode 1990. The admissible probability of failure, and a fortiori the partial factors, would not be imposed uniformly for each class of consequences, but would be determined on a case-by-case basis according to the extent of the risks to which the failure of the structure would expose its environment: loss of human life, operating losses, reconstruction costs, damage to the natural environment, etc.

Until now, design rules have mainly taken into account probabilizable uncertainties. However, experience with ruins, pathologies and incidents affecting structures shows that radical uncertainties, which are not probabilizable (in the frequentist sense of the term) are the main causes of these disorders. What's more, the reality of climate change introduces an additional term of radical uncertainty for dimensioning. As a result, the "philosophy" of civil engineering safety is likely to evolve further. Foresight and scenario-based methods would be added to the toolbox. In addition to the robustness required by the Eurocodes for accidental situations, there may be a need for resilience in the form of adaptive design and dimensioning.

With these evolutions, foreseeable or otherwise, with these changes and transitions, a rapid adaptation is a necessary condition for survival. This makes the demand for methodology and

standardization all the more intense. Such a demand is approaching the frontiers of professional practice, requiring shorter innovation times and a faster transition from new knowledge to application and generalization. The demand for having new and updated reference documents as quickly as possible is a real challenge for research. It leads us to take a fresh look at the challenges of pre-normative research. From my prospective the dialogue between safety and economy should be pursued through new efforts of pre-normative research that would respond diligently to the contemporary challenges of resource conservation, durability of civil engineering structures and adaptability of the functions they have to fulfil.

Mots-clé

Génie civil, ouvrages maritimes, ouvrages fluviaux, ouvrages portuaires, fiabilité, probabilité de ruine, indice de fiabilité, Eurocode, état-limite, coefficient de sécurité, combinaison d'actions

Key words

Civil engineering, marine structures, river structures, port structures, reliability, probability of failure, reliability index, Eurocode, limit state, safety factor, combination of actions

Enjeux et motivations

Le 11 septembre 1991, un accident mortel survenu sur un chantier portuaire dont j'avais la responsabilité a joué un rôle déterminant dans le déroulement de ma carrière.

J'avais commencé mes activités professionnelles l'année précédente à la Direction départementale de l'équipement de la Manche, en tant que responsable d'un « arrondissement » de travaux portuaires et routiers, basé à Cherbourg. Parmi le vaste programme de travaux à réaliser figurait l'extension d'un poste d'accostage sur le port de commerce de Cherbourg pour les *car ferries*, dont le trafic avec les Iles britanniques allait croissant tant en passagers motorisés qu'en camions de marchandises. L'extension de ce « Poste 4 » permettait d'accueillir des navires plus longs et de plus fort tonnage. Ce poste était conçu comme une « gabionnade », c'est-à-dire une série de gabions circulaires (ce sont des enceintes circulaires d'une dizaine de mètres de diamètre et d'une quinzaine de mètres de haut, formées de palplanches métalliques plates fichées dans le sol et simplement remplies de sables et graviers) placés en alignement à distance les uns des autres et reliés entre eux par des « cellules de raccordement » (encore des palplanches métalliques plates formant des arcs de cercle, l'espace intérieur étant rempli du même matériau géotechnique). Les arcs de raccordement sont géométriquement placés de telle sorte que l'ensemble offre un front d'accostage bien aligné. L'intersection du gabion et de la cellule de raccordement est constituée d'une « palplanche triple », palplanche spéciale dans laquelle une demi-palplanche plate (qui débute l'arc de raccordement) est soudée sur une palplanche plate complète (du gabion). La soudure est faite en usine. Toutes ces palplanches y compris la spéciale sont enfoncées dans le sol par battage (en étant adossées à une structure-guide de battage qui maintient la verticalité des éléments), puis le remplissage des cellules assure la stabilité générale de l'ouvrage composite. Une superstructure béton est ensuite coulée pour servir de voie de circulation et de poutre d'accostage, puis les équipements sont posés (échelles, défenses d'accostage, bollards d'amarrage, mâts d'éclairage...).

Ce travail se fait à l'avancement. Le Poste 4 était constitué d'une demi-douzaine de gabions circulaires avec leurs cellules de raccordement. Les gabions les plus proches du musoir avaient été battus et les enceintes métalliques commençaient à être remplies. Le matériau déchargé par camion sur le musoir était acheminé en bordure de cellule par des chargeurs pour y être déversé, puis le chargeur avançait sur la cellule fraîchement remplie afin d'étaler le matériau et régler proprement la surface, et, de cellule en cellule, progressait ainsi vers la mer. Le chargeur travaillait sur une cellule de raccordement quand une palplanche triple se rompit brutalement, l'enceinte se déchira et le matériau se vida dans le port entraînant l'engin et son conducteur.

Que de questions furent soulevées pendant l'expertise judiciaire ! L'acier des palplanches était-il bon ? Les soudures avaient-elles été correctement exécutées ? Le mode opératoire du remplissage des cellules n'avait-il pas causé des contraintes excessives sur les enceintes métalliques ? Les matériaux utilisés n'étaient-ils pas à l'origine d'efforts de poussée trop importants ? Et si la cause était à rechercher dans un problème de battage ? peut-être un dégraphage en pied de palplanche mal repéré ? Le dimensionnement était-il conforme aux normes et règlements en vigueur, et aux règles de l'art ? etc.

Cette expertise fut menée en relation étroite avec le Service technique central des ports maritimes et des voies navigables (intégré depuis au Cerema) et le Laboratoire régional des Ponts et chaussées de

Saint Brieuc (également intégré depuis au Cerema). Un compromis financier fut trouvé entre l'Etat et les acteurs assistés par leurs assurances respectives, l'ouvrage fut reconstruit dans une conception différente (Figure 1, Photo 1) mais plus coûteuse (par juxtaposition de gabions circulaires ce qui permettait d'éviter les cellules de raccordement, et une superstructure béton plus ferrillée pour compenser les encorbellements) et l'affaire fut classée sans suite sur le plan pénal.

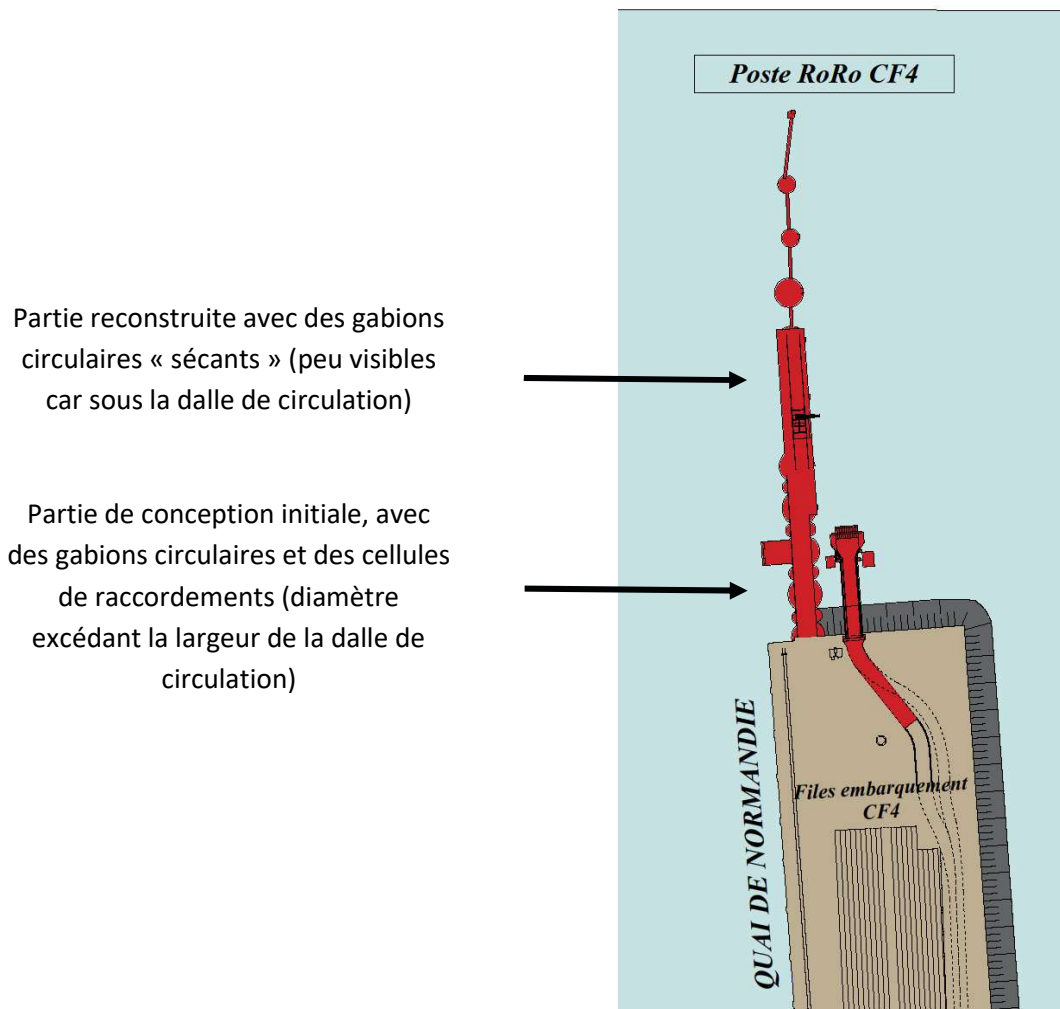


Figure 1. Vue en plan du poste n°4 pour *car ferries*, port de Cherbourg (Plan général des infrastructures, SPL Cherbourg Port)

Mais des questions scientifiques restaient mal résolues, en particulier le calcul des contraintes dans cette « palplanche triple ». La maigre littérature scientifique examinée lors de l'expertise judiciaire avait en effet mis en évidence que les formules utilisées pour la justification des cellules de raccordement – formées rappelons-le de deux arcs circulaires connectés à deux autres arcs circulaires orientés différemment et de courbures différentes – étaient établies de manière assez empirique par extension de l'expression utilisée pour les gabions circulaires (formule « des chaudronniers » : $T = (p_i - p_e) \times R$, où T est la traction orthoradiale dans l'enceinte par unité de hauteur du gabion, p_i est la pression intérieure exercée par le matériau de remplissage, p_e est la pression extérieure, par exemple, hydrostatique pour un gabion immergé, R est le rayon du gabion), mais avec un manque de rigueur théorique (pas d'équilibre au point de raccord) ou des hypothèses de modélisation peu réalistes (déformations d'équilibre membranaire).

Ma curiosité était éveillée sur les incertitudes de toute nature qui entourent un projet de construction. Elle était stimulée par la prise de conscience de la nécessité de travaux de recherche pour compléter une documentation technique insuffisante. J'aborderai dans la section 2.2.1 les travaux de recherche auxquels j'ai participé de 1993 à 1998 au STCPMVN sur la compréhension et la modélisation du comportement des palplanches de raccord en interaction avec le massif géotechnique de remplissage et qui ont, entre autres, supporté la thèse d'Alain Corfdir (1997).



Photo 1. Poste n°4 pour *car ferries*, port de Cherbourg, Manche (Photo : Ports de Normandie)

Ces circonstances ont indéniablement contribué à ma motivation pour l'étude de l'incertain et ses applications à la sécurité des constructions, à des coûts qui doivent rester abordables. Car dès avant l'accident de Cherbourg, mon travail de fin d'études de l'ENPC (1989-1990) m'avait déjà fortement sensibilisé à la question des coefficients de sécurité. Il s'agissait de la stabilité de pentes renforcées calculées à la rupture et avec les approches classiques par les cercles de glissement.

Tout ceci a donc orienté mon désir de poursuivre mes activités professionnelles au STCPMVN, où j'ai mené des travaux (synthèse dans [1], [2], [3] et [4]) qui ont contribué à compléter les règles normatives que l'on trouve dans les Eurocodes, puis en rejoignant le Port autonome de Rouen et enfin l'Ifsttar (devenu l'université Gustave Eiffel) après un long passage d'une dizaine d'années, très enrichissant, dans l'administration centrale du ministère chargé des infrastructures et des transports

Les activités scientifiques que j'ai poursuivies au long de ma carrière tout en occupant des postes d'encadrement et de direction au sein de ces différentes structures, ont été autant utiles dans la conduite de dossiers qui m'étaient confiés qu'enrichissantes sur le plan professionnel et personnel.

Elles m'ont ainsi permis d'étudier les méthodes de prise en compte du risque dans le génie civil et de les croiser avec les approches des risques et incertitudes dans l'évaluation socio-économique des projets d'infrastructure.

Après avoir coordonné l'élaboration de nouvelles recommandations techniques pour le calcul aux Eurocodes des ouvrages en site aquatique, j'ai moi-même mis ces textes en application dans la construction d'un quai à Honfleur.

En tant qu'intervenant dans des formations d'écoles d'ingénieurs et universitaires, cette expérience m'a permis de déployer une approche pédagogique où l'on prend du recul sur l'importance des codes de calcul dans la maîtrise des risques. De même la connaissance de la normalisation *de l'intérieur* en participant à des commissions de normalisation des Eurocodes et à des instances de gouvernance de l'Afnor (comité d'orientation stratégique, comité de coordination et de pilotage de la normalisation, conseil d'administration) m'a conduit à présenter le fonctionnement des commissions et de démythifier la manière dont les décisions sont prises et les textes approuvés.

L'expérience acquise sur les ouvrages en site aquatique m'a ouvert des portes donnant sur d'autres domaines. Mes activités d'animation ou de pilotage de la recherche se sont diversifiées vers les ouvrages souterrains, où l'on m'a sollicité pour participer puis pour présider le conseil scientifique du Centre d'étude des tunnels, vers les routes et ouvrages d'art (présidence de sessions des Rencontres Ouvrages d'Art, participation au bureau de l'IDRRIM) et vers les Systèmes de transport intelligents (présidence de sessions des colloques ATEC-ITS, membre du *board* des congrès mondiaux ITS).

Aujourd'hui, dans l'environnement universitaire qui est désormais le mien, je souhaite valoriser cette expérience par le diplôme de doctorat. Cet éminent grade universitaire me conférerait un meilleur positionnement dans l'exercice de mes missions actuelles et à venir en représentation de l'université Gustave Eiffel. Il me donnerait également une meilleure visibilité pour mes activités d'enseignement, et me permettrait d'être plus facilement associé à des opérations de recherche et à leur valorisation, notamment à l'international.

Partie 1. Parcours professionnel et personnel

Construire un ouvrage de génie civil, c'est choisir des matériaux en qualité et en quantité et les disposer dans l'espace en restant à un coût abordable, de manière à ce que l'ouvrage remplisse ses fonctions pendant une durée minimale, qui va de plusieurs dizaines à une centaine d'années ou plus, sans nécessiter de grosses opérations de réfection. Mais tout n'est pas connu quand on élabore le projet, loin s'en faut. Quelles sera la vitesse maximale du vent à laquelle sera soumis l'ouvrage durant les cinquante à cent prochaines années ? Quelle sera l'évolution des charges à l'essieu des futurs camions qui emprunteront le pont à ces échéances ? Quelle sera la résistance mécanique réelle ou la porosité des bétons même pas encore coulés, qui constitueront l'ouvrage ? Quelles sont les valeurs réelles des propriétés physico-mécaniques des couches de sol entre les sondages effectués ? Peut-on croire que les charges admissibles de stockage sur le terre-plein portuaire seront bien respectées dans la durée par tous les exploitants du terminal ? etc.

Le fil conducteur de mon parcours est tendu par la curiosité portée aux approches conceptuelles de l'incertain et à leurs applications, dans différents contextes de la construction avec un accent particulier en direction des ouvrages en site aquatique. Les questions sont : comment identifier une ligne de crête entre le sur-dimensionnement à risque résiduel faible et à coût élevé et le sous-dimensionnement aux effets inverses, et comment les modélisations probabilistes et les démarches d'analyse des risques éclairent cette recherche d'un *optimum*.

Quatre grandes périodes de production intellectuelle sont décrites dans cette partie, avec pour certaines des chevauchements. La période 1993 et 2000 est marquée par l'initialisation d'un travail de fond sur la sécurité des ouvrages portuaires et la théorie de la fiabilité dans le génie civil (quais massifs, rideaux de soutènement, quais sur pieux). La période 1996-2006 voit un élargissement du travail précédent vers les barrages de navigation puis les barrages de retenue. La période 2008-2011 est celle de la rencontre avec les théories de l'incertain dans l'économie et la finance et de l'approfondissement, qui en est la conséquence, de mon regard sur l'incertain dans le génie civil. En 2018, revenant dans le domaine des Eurocodes, commence un nouvel élargissement de mes travaux vers les digues et les ouvrages côtiers.

Cette première partie se conclut par quelques éléments sur mes activités de diffusion scientifique et une analyse FFOM (ou *SWOT* en anglais).

1.1. Approche de la sécurité des ouvrages portuaires avec les Eurocodes (1993-2000)

Après que le dossier de l'accident de Cherbourg eut été réglé, le directeur du STCPMVN m'a proposé de rejoindre son service pour travailler à la 1^{ère} génération des Eurocodes et adapter les règles de dimensionnement des ouvrages portuaires à ce nouveau « format de sécurité » européen en cours de finalisation. Il n'y avait pas de doute sur l'opportunité de ce travail vu le vaste mouvement qui s'opérait à ce moment dans le génie civil en faveur d'une approche « rationnelle » de la sécurité, c'est-à-dire fondée sur des analyses de nature probabiliste davantage que sur les marges heuristiques de sécurité.

Quelques années plus tard le grave endommagement du port de Kobe sous le séisme Hanshin-Awaji (Photo 2) confirmait malheureusement l'enjeu de travailler à la sécurité du génie civil portuaire.

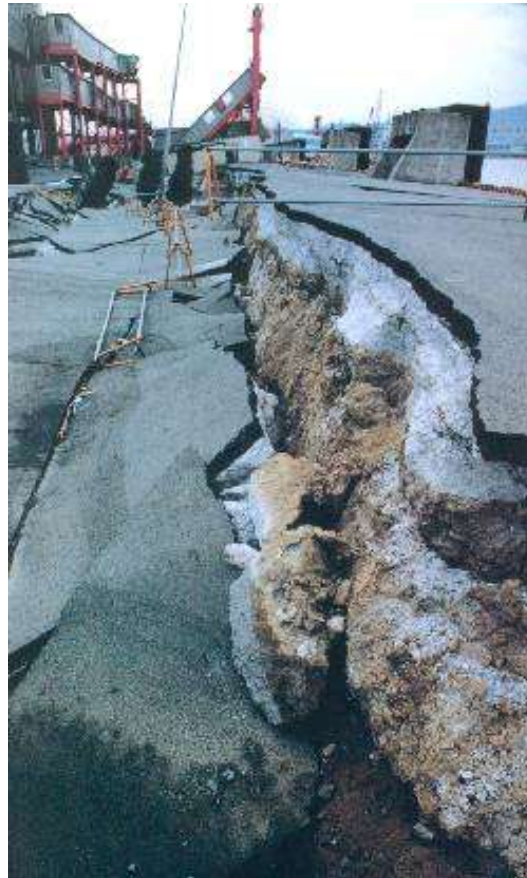


Photo 2. Basculement des quais-caissons du port de Kobe, Japon, 17 janvier 1995 (Photo : Nezumi Dumousseau)

1.1.1 Politique économique et politique de sécurité dans les Eurocodes

Les Eurocodes ont été élaborés progressivement sur une initiative de la Commission européenne prise en 1975 dans le but d'éliminer les obstacles aux échanges de services d'ingénierie de la construction. L'existence de spécifications techniques nationales pour la construction, substantiellement différentes d'un pays à l'autre, représentait en effet une entrave significative aux échanges et s'opposait à la création du grand marché européen. Les Eurocodes devaient ainsi constituer un ensemble de règles techniques pour le dimensionnement des ouvrages, communes à tous les Etats membres, et contribuer à homogénéiser les niveaux de sécurité.

Au début la Commission européenne pilotait elle-même la rédaction des Eurocodes. Mais ce travail s'est révélé plus complexe qu'anticipé et nécessitait un savoir-faire particulier afin d'amener les groupes de travail vers le consensus. En effet même si les experts nommés dans les groupes de travail étaient censés ne parler qu'au nom de leur expertise scientifique et promouvoir les méthodes de calcul du meilleur niveau européen, comment auraient-ils pu totalement se prémunir des pressions et influences vu les enjeux économiques, politiques et concurrentiels ? Dès lors, au-delà de la seule question des Eurocodes et pour accélérer l'élimination des entraves techniques aux échanges économiques la Commission a mis en place une nouvelle approche en 1985 dans laquelle des actes

législatifs européens (directives ou règlements) fixent des « exigences essentielles » et des normes européennes « harmonisées » décrivent des solutions permettant de les atteindre.

Dès 1975, la Directive « Marchés publics » avait demandé aux maîtres d'ouvrage publics de faire référence aux normes dans leurs marchés, les normes nationales transposant les normes européennes ayant priorité sur les normes internationales et sur les normes « purement » nationales. En effet même si les normes européennes sont élaborées par l'un des trois organismes européens de normalisation (le CEN, le CENELEC et l'ETSI), elles ne sont pas publiées par ceux-ci mais par les organismes nationaux de normalisation (Afnor, en France). Ces derniers sont tenus de les reprendre dans leur intégralité dans leurs collections nationales et de retirer les normes nationales incompatibles.

C'est en 1988 que la Directive « Produits de Construction » a introduit la nouvelle approche dans le domaine du bâtiment et du génie civil et défini les exigences essentielles à satisfaire par les constructions. L'année suivante, la Commission a transféré l'élaboration des Eurocodes au CEN et a changé leur statut en celui de norme européenne.

Dans la recherche d'une meilleure homogénéité des niveaux de sécurité entre pays et entre types d'ouvrages, le CEN décida de mettre en œuvre le format de sécurité dit « semi-probabiliste aux états-limites » en se basant sur d'importants travaux menés dans les années 1960 dans le domaine des constructions en béton, le code-modèle du Comité européen du béton. Dans ce format des coefficients de sécurité (coefficients partiels) sont calés de manière à ce que les probabilités de survenance des phénomènes indésirables sur une année ou sur la durée de vie de l'ouvrage (ou probabilités de défaillance) restent inférieures à des valeurs limites qui dépendent de la sévérité de ces défaillances, ou états-limites (typiquement 10^{-6} par an pour les phénomènes les plus dommageables, ou états-limites ultimes, 10^{-3} par an pour les phénomènes appelés états-limites de service).

Comme les questions liées à la sécurité n'ont pas été remontées par subsidiarité au niveau européen et restent du domaine de responsabilité des Etats membres, les Eurocodes maintiennent la possibilité pour chaque Etat de déterminer à son propre niveau, les éléments structurants liées à la sécurité : c'est ainsi que des annexes nationales aux Eurocodes, publiées par chacun des organismes nationaux de normalisation, sont en capacité de prescrire des valeurs des coefficients de sécurité autres que celles figurant dans la norme européenne, de préciser des valeurs ou des classes là où la norme européenne prévoit des alternatives ou quand celle-ci ne donne qu'un symbole, ou encore de décrire des procédures de calcul alternatives, et bien sûr d'indiquer des données géographiques ou climatiques propres à un pays (comme des cartes de vent, de neige, d'aléa sismique...).

En 1993 les Eurocodes ENV 1990 « Bases du calcul », ENV 1992 « Construction en béton » et ENV 1993 « Construction métallique » venaient d'être publiés comme normes expérimentales volontaires. Une période de test de plusieurs années avait été accordée par le CEN pour permettre aux organismes nationaux de normalisation, et par-delà les communautés techniques de la construction, d'acquérir un retour d'expérience sur l'application de ces normes à la conception et la construction d'ouvrages réels, et de faire remonter tous éléments utiles pour améliorer les textes normatifs avant leur publication comme normes européennes (« EN » tout court) constituant la 1^{ère} génération des Eurocodes. Ces normes avaient été élaborées pour des applications dans les marchés les plus significatifs, les bâtiments et les ponts routiers et ferroviaires. Par ailleurs la rédaction de l'Eurocode géotechnique (futur EN 1997) était encore en cours. La préoccupation du STCPMVN était alors d'examiner dans

quelle mesure ces normes « terrestres » s'appliquaient aux ouvrages en site aquatique, si des adaptations devaient leur être apportées, si des compléments étaient nécessaires.

Certes, en France, le chiffre d'affaires des travaux maritimes et fluviaux représente moins de 1% du chiffre d'affaires des travaux publics (FNTP, 2022). Mais les ports, les voies d'eau et le littoral représentent un fort enjeu socio-économique en termes d'acheminement de marchandises (ports maritimes, voies navigables), de protection contre l'érosion et les submersions marines (ingénierie côtière) et de gestion de la réserve en eau (réseau fluvial). De plus l'exécution des travaux en site aquatique est généralement plus risquée à cause d'un environnement particulièrement sensible à la météo, plus sévère et plus changeant.

1.1.2 Nécessaire adaptation du format de sécurité

En prenant connaissance des Eurocodes, je me suis aperçu du retard accumulé dans les pratiques de dimensionnement des ouvrages en site aquatique, et de la nécessité de mener des actions de recherche ciblées pour amener le secteur à un niveau comparable à celui des ouvrages terrestres.

Après avoir mené une étude de l'état de l'art pour comprendre les causes et circonstances de ce retard accumulé, il m'est apparu en consultant notamment (Mathieu, 1975), les Directives Communes de 1979 (ministère de l'Équipement, 1979), (Calgaro, 1991a) et les versions de l'époque des codes de calcul étrangers mentionnés au chapitre des *Références*, spécialement les textes allemands (EAU, 1990) et espagnols (ROM, 1990) sur les ouvrages portuaires, que ce retard portait sur un certain nombre de points en relation avec le nouveau format de sécurité de l'EN 1990 « Bases du calcul ». Les questions scientifiques et méthodologiques sous-jacentes seront expliquées plus bas. L'ouvrage de synthèse ROSA 2000 dont j'ai coordonné la rédaction a ainsi apporté une vision méthodologique nouvelle pour la prise en compte de l'incertain dans le dimensionnement des quais, synthétisée dans le diagramme en Figure 2 (page suivante).

Cette adaptation du format de sécurité est détaillée dans ce qui suit. Les aspects scientifiques sont présentés dans les sections 2.2.3, 2.2.5 et 2.2.6.

1.1.3 Situations de projet

En ce qui concerne les *situations de projet*, l'approche traditionnelle envisageait des « situations normales » d'exploitation de l'ouvrage sous des conditions climatiques (houle, vent) courantes, des « situations exceptionnelles » d'exploitation de l'ouvrage sous des conditions climatiques plus sévères ou avec un accostage sévère, parfois des situations accidentelles (vent de tempête, séisme, choc de bateau). En l'absence de textes de référence, les valeurs des paramètres à prendre en compte dans les calculs (notamment pour les charges ou actions) étaient déterminées au cas par cas par le projeteur pour chacune de ces situations (valeur normale, valeur exceptionnelle valeur extrême). En m'alignant sur le nouveau vocabulaire européen harmonisé et en me référant à la définition très éclairante des situations de projet dans les Directives communes de 1979 (ministère de l'Équipement, 1979) : « *Chacune des situations est caractérisée par l'intervalle de temps pendant lequel les distributions ou les processus de toutes les données de la sécurité de la construction peuvent être considérées comme constants* », j'ai commencé à introduire le format des Eurocodes en convertissant les situations normales et exceptionnelles en « situations durables », en développant l'usage des « situations transitoires » pour les phases de construction et de maintenance, tout en réservant les « situations accidentelles » aux probabilités d'occurrence les plus faibles (inférieures à 10^{-4} par an).

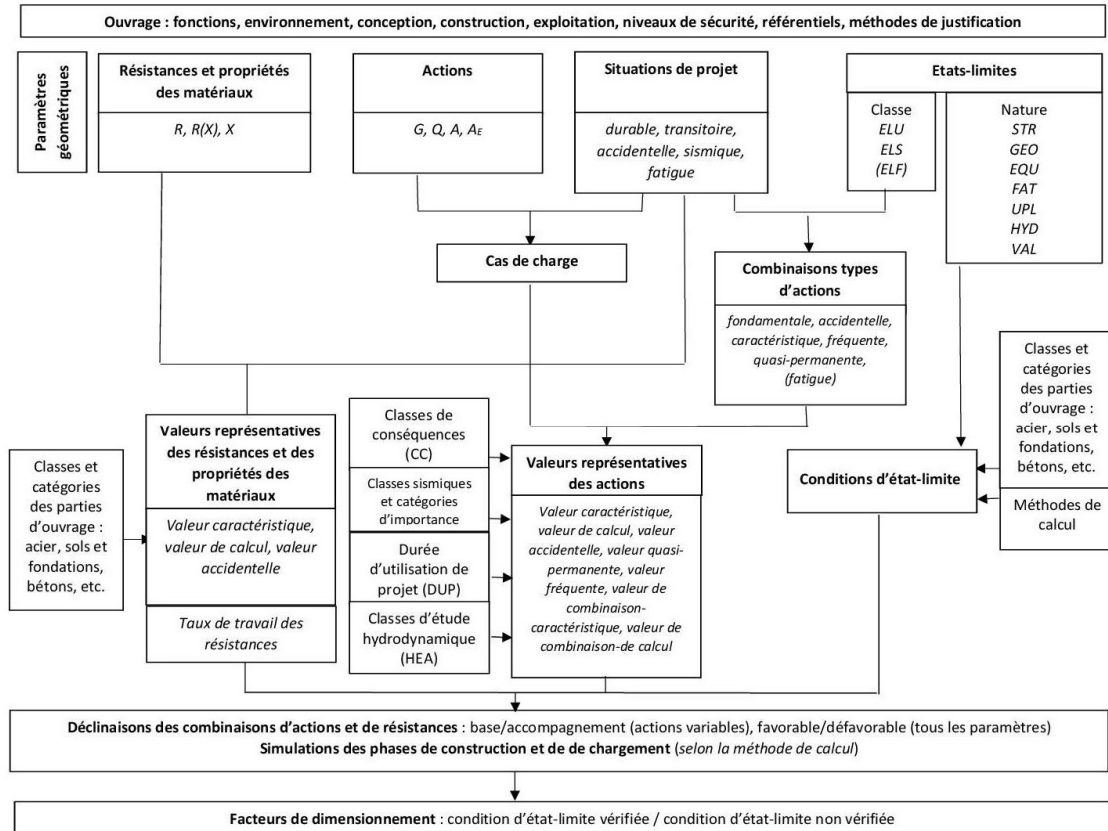


Figure 2. Diagramme des vérifications des ouvrages en site aquatique selon les Eurocodes (source : cours donné en M2 et [8])

Il était nécessaire de travailler aux actions (charges) et de reprendre l'ensemble des coefficients partiels de sécurité des Eurocodes de manière à éviter que ces normes européennes ne viennent bouleverser l'économie des travaux maritimes et fluviaux par une application en aveugle des méthodes développées pour les ponts et bâtiments sous charges de trafic, de vent et d'exploitation, tout en assurant des niveaux de sécurité convenables.

1.1.4 Valeurs caractéristiques des actions variables portuaires

Pour être cohérent avec ces nouvelles situations de projet, il fallait définir les *valeurs caractéristiques des actions* spécifiques sur les ouvrages portuaires. Ce sont les actions dues au navire (accostage et amarrage sur un quai ou un duc d'Albe), les actions dues aux marchandises (charge de stockage sur un terre-plein, descentes de charge des outillages de manutention portuaire), les actions de l'eau (houle sur les digues de protection, courant sur les berges, les pieux et les ducs d'Albe, dénivelées hydrostatiques de part et d'autre d'un écran de soutènement) et les efforts de manœuvre des parties mobiles (portes d'écluses, tabliers des ponts mobiles).

Si l'Eurocode définit la valeur caractéristique d'une action variable (Q_k) comme celle qui a une période de retour de 50 ans, les applications qui en sont faites témoignent d'une assez grande variabilité puisque la valeur caractéristique de la charge de trafic routier sur les ponts est plutôt de l'ordre de 1000 ans, les valeurs caractéristiques des charges d'exploitation des bâtiments sont données dans les normes sans référence explicite à des périodes de retour, seules celles des actions du vent et de la neige sont réputées être des valeurs cinquantennales. Plusieurs travaux de stagiaires ont permis

d'avancer sur ces questions. Le détail de ces stages figure en annexe C. Nous avons proposé des règles adaptées à chaque cas de figure pour l'accostage et l'amarrage (Brocvielle, 1996) et (Malige, 1997), les chocs accidentels de navires (Lasquellec, 1998) avec la communication [23], les effets du vent (Pointhière, 1995), les descentes de charge des outillages portuaires (Jean, 1996), les charges de stockage sur les terminaux à conteneurs (Loriol, 1995) et (Lair, 1996), les niveaux d'eau dans les bassins portuaires (Mansandre, 1998) en utilisant le traitement statistique des surcotes et décote du SHOM (Barbot, 1998), ce travail ayant fait l'objet de la communication [38]. Afin d'assurer une continuité raisonnable avec l'économie du génie civil portuaire, il convient que la « valeur caractéristique » se retrouve proche de la « valeur normale » de l'approche traditionnelle. Le détail de ces stages figure en annexe C.

Mais avec la dispersion des pratiques, quelle est la « valeur normale » ?

J'ai construit progressivement les réponses au cas par cas en analysant plusieurs notes de calcul et en proposant des méthodes harmonisées à la validation du groupe de pilotage de ROSA 2000 :

- pour l'accostage, en exploitant les vitesses nominales du navire données dans le rapport (PIANC, 2020) avec une période de retour égale à la durée d'utilisation de projet de la défense d'accostage (20-25 ans) avec validation par l'expertise locale (pilotes, officiers de port) ;
- pour l'amarrage (Photo 3), en se référant à la résistance nominale du bollard ou de l'organe d'amarrage, elle-même choisie pour résister aux tractions du navire de projet dans des conditions de forçage décennal par la houle, le vent et le courant ;



Photo 3. Navire amarré à Port 2000 avec le système ShoreTension©, port du Havre (Haropa), Seine-Maritime (Photo : Gazette Normandie)

- pour les charges de stockage, en proposant au projeteur d'assimiler les valeurs traditionnelles, soit à la valeur caractéristique, soit à la valeur de calcul, selon que la valeur traditionnelle sera considérée comme une estimation sécuritaire ou non de la valeur maximale de la charge pouvant s'exercer sur le terre-plein ;
- pour les descentes de charge des outillages portuaires, en envisageant deux situations de projet dans la ligne des propositions de la norme NF E-52-700, en référence à la vitesse du vent (Sacre, 1993) : une situation « en service » définie par une vitesse de vent limite de travail

(couramment 72 km/h en vitesse de pointe), une situation « hors service » définie par une vitesse de vent à déterminer sur chaque site comme la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 70% de l'estimation locale de la vitesse de pointe centennale, ou autre valeur issue de l'expertise locale (couramment 150-170 km/h) ;

- pour les niveaux d'eau dépendant des variations de la marée, des débits fluviaux et des « anomalies météorologiques » (surcotes, décotes), en prenant une période de retour comme référence ; toutefois l'analyse des approches traditionnelles a mis en évidence un décalage entre le maritime, le portuaire et le fluvial : le maritime, en cohérence avec l'approche de l'industrie offshore, retient comme valeur caractéristique une période de retour centennale (cf. section 2.2.4), le portuaire une période de retour décennale et le fluvial, entre les deux, une période de retour vingtennale.

De cette époque datent également mes travaux sur les chocs de bateaux contre les piles de pont en vue de contribuer à l'EN 1991-7, avec une communication au congrès ICASP7 [19] et la rédaction de parties du rapport du groupe de travail PIANC *Ship Collisions With Bridges* [4] (cf. sections 2.4.1 et 2.4.2).

1.1.5 *Combinaisons d'actions*

Une des questions souvent posées concernait la formation des *combinaisons d'actions*. J'ai mis en évidence la nécessité de distinguer quatre notions qui étaient à cette époque mélangées et imprécises, ce qui ne favorisait pas la compréhension du format de sécurité des Eurocodes : les « cas de charge », les « combinaisons types d'actions », les « valeurs de combinaison », les « déclinaisons des combinaisons d'actions ».

Dans l'approche traditionnelle, on ne forme qu'une seule combinaison d'actions, qui peut s'écrire de manière symbolique :

$$\sum_i G_i + \sum_j Q_j \tag{1}$$

Les actions permanentes (les G_i) et variables (les Q_j) sont prises à des valeurs plus ou moins sécuritaires selon que l'on forme cette combinaison d'actions en situation normale ou en situation exceptionnelle.

J'ai explicité les relations entre les éléments ci-après du format des vérifications, dont la compréhension par les acteurs de la construction était parfois confuse, et j'ai lancé des actions de formation auprès des acteurs de la construction (cf. Annexe D) :

- les *cas de charge* comme l'énoncé des actions permanentes (G), variables (Q) et accidentelles (A) compatibles entre elles et susceptibles de s'appliquer simultanément à l'ouvrage, indépendamment de leurs intensités ; un ou plusieurs cas de charge peuvent être formés dans chacune des situations de projet considérées.

Par exemple, en situation durable :

Poids propre « + » Poussées des terres « + » Pression » hydrostatiques « + » Descente de charge
d'une grue sur ses appuis « + » Accostage d'un navire

Poids propre « + » Poussées des terres « + » Pression » hydrostatiques « + » Descente de charge
d'une grue sur ses appuis « + » Amarrage d'un navire

Par exemple, en situation sismique :

Poids propre « + » Poussées des terres « + » Pression » hydrostatiques « + » Descente de charge d'une grue sur ses appuis « + » Amarrage d'un navire « + » Forces d'inertie dues au séisme

- les *combinaisons types d'actions*, au nombre de six. Elles diffèrent entre elles par la sélection des valeurs représentatives des actions, et partant par leurs probabilités de dépassement sur la durée de vie du projet : combinaisons quasi-permanente, fréquente, caractéristique, fondamentale, accidentelle, sismique ; le Tableau 1 ci-dessous donne leurs expressions formelles avec l'effet des actions (E) et les résistances R_k , complétées par les coefficients partiels de résistance ;

Nom de la combinaison-type	Expression formelle des effets des actions et des résistances
Fondamentale	$E \{ G_d + Q_{1,d} + \sum_i \Psi_{0,i} \cdot Q_{i,d} \}$ et R_k / γ_R
Accidentelle	$E \{ G_k + A + \Psi_{1,1} \cdot Q_{1,k} + \sum_i \Psi_{2,i} \cdot Q_{i,k} \}$ et $R_k / \gamma_{R,acc}$
Sismique	$E \{ G_k + \text{forces d'inertie sous séisme} + \sum_i \Psi_{2,i} \cdot Q_{i,k} \}$ et $R_k / \gamma_{R,sism}$
Caractéristique (ou rare)	$E \{ G_k + Q_{1,k} + \sum_i \Psi_{0,i} \cdot Q_{i,k} \}$ et $R_k / \gamma_{R,serv}$
Fréquente	$E \{ G_k + \Psi_{1,1} \cdot Q_{1,k} + \sum_i \Psi_{2,i} \cdot Q_{i,k} \}$ et $R_k / \gamma_{R,serv}$
Quasi-permanente	$E \{ G_k + \sum_i \Psi_{2,i} \cdot Q_{i,k} \}$ et $R_k / \gamma_{R,serv}$

Tableau 1. Combinaisons types d'actions (source : adapté de la norme NF EN 1990)

- les *valeurs de combinaison* d'une action variable. En effet la probabilité de dépassement d'une combinaison type caractéristique ne sera pas la même si l'on considère une seule action variable prise à sa valeur cinquantennale, ou deux actions variables prises simultanément à leur valeur cinquantennale. La probabilité dépend de la corrélation entre les deux actions variables. A titre d'exemple, un calcul très simple avec deux actions dont les variations sont supposées représentées par des lois normales, permet de montrer que la probabilité d'observer en même temps, sur une année quelconque, les deux actions avec leur valeur cinquantennale (on suppose une réalisation par an de chaque variable aléatoire), varie de 1/50 si les deux actions sont totalement corrélées, à 1/555 environ si les deux actions sont totalement indépendantes. Aussi, pour que la probabilité de dépassement de la combinaison de deux actions variables soit proche de celle d'une valeur caractéristique, on réduit la sévérité de l'une de ces actions en appliquant à sa valeur caractéristique « un facteur de combinaison » noté ψ_0 , inférieur à 1,00. Le facteur de combinaison n'est pas un coefficient de sécurité ! La notion qui en est dérivée de « période de retour de combinaison » sera introduite dans la section 2.2.4 ;
- les *déclinaisons des combinaisons d'actions* correspondent quant à elles à une recherche de modération dans le format de sécurité, selon l'expression familière « je reprends d'une main ce que j'ai donné de l'autre ». En reprenant l'exemple précédent, ce que la tradition a nommé « règle de combinaison de Turkstra » consiste à calculer deux combinaisons d'actions (deux « déclinaisons ») en appliquant le facteur de combinaison successivement à chacune des actions variables du cas de charge et à retenir l'effort résultant le plus défavorable :

$$\text{Max} \{ (Q_{1k} \llcorner + \llcorner \psi_0 \cdot Q_{2k}) ; (\psi_0 \cdot Q_{1k} \llcorner + \llcorner Q_{2k}) \}$$

Cette règle est étendue par simplicité aux cas de charge comportant plus de deux actions variables.

L'exemple ci-dessus est bâti sur la combinaison type caractéristique. Il peut être étendu à la combinaison type fondamentale en considérant non plus la probabilité de dépassement d'une valeur

caractéristique mais celle d'une valeur de calcul. Bien sûr le facteur de combinaison devrait être pris à une valeur différente selon l'action variable à laquelle il s'applique, selon le nombre d'actions variables du cas de charge, selon la combinaison type considérée. Toutefois le compromis entre la rigueur de la méthode et la simplicité d'usage a conduit à ne prescrire qu'une seule valeur de ψ_0 par action, réputée valable pour tous les cas de figure.

Ce travail sur les combinaisons d'actions m'a permis de montrer là encore une ambiguïté dans la signification de facteur quasi-permanent ψ_2 . En effet, dans la présentation théorique des bases du calcul, la valeur quasi-permanente d'une action variable ($\psi_2 \cdot Q_k$) est sa valeur moyenne dans le temps et dès lors la combinaison type quasi-permanente est une combinaison qui a une probabilité d'environ 50% d'être dépassée. Toutefois le facteur ψ_2 intervient à la fois : dans la combinaison type fréquente, où il doit être interprété comme un facteur de combinaison par rapport à la valeur fréquente d'une action variable de base ; dans la combinaison type accidentelle et dans la combinaison type sismique, où il doit être interprété comme un facteur de combinaison par rapport à l'action accidentelle. Là encore par le compromis entre la rigueur de la méthode et la simplicité d'usage a conduit à ne prescrire qu'une seule valeur de ψ_2 par action, quoiqu'au détriment de la bonne compréhension du format de sécurité.

1.1.6 Etats-limites

Il était également nécessaire de préciser ce qu'il fallait entendre par *état-limite*. La réflexion menée dans [12] et [13] a éclairé les imprécisions du langage courant ainsi que la polysémie du terme qui peut être compris tour à tour comme :

- un phénomène préjudiciable à la stabilité de l'ouvrage, ou un mécanisme de ruine, ce qui est à l'origine du classement des états-limites dans les catégories d'états-limites de structure (STR, comme la rupture par flexion, traction ou compression excessive), géotechniques (GEO, comme le défaut de capacité portante), hydrauliques (HYD, comme l'érosion régressive, la boulangerie), de fatigue (FAT), de perte d'équilibre statique (EQU), de soulèvement (UPL) ;
- un critère de performance, ce qui conduit à exprimer les conditions d'état-limite sous la forme d'inégalités : par exemple « Sollicitation < Résistance », « Tassement < Valeur limite de service », etc. ;
- l'importance des conséquences si le phénomène préjudiciable se produit ou si la performance n'est pas au rendez-vous, ce qui donne lieu au classement entre états-limites ultimes (ELU, très graves s'ils se produisent) et états-limites de service (ELS, graves mais moins que les ELU) ;
- la modélisation du comportement du matériau ou de la structure, proche de la rupture ou dans le domaine des petites contraintes et petites déformation, d'où les expressions issues du béton armé, bien pratiques mais source de confusion quand on les applique à d'autres contextes : « calcul à l'ELU, calcul à l'ELS ».

Le Tableau 2 présente les combinaisons types d'actions à utiliser pour vérifier les états-limites relevant de la catégorie des ELU ou des ELS selon la situation de projet. Il fait le lien entre les notions présentées dans les sections 1.1.3, 1.1.5 et 1.1.6.

Catégorie d'état-limite	En situation durable ou transitoire	En situation accidentelle	En situation sismique
Etat-limite ultime	- Combinaison type fondamentale	- Combinaison type accidentelle	- Combinaison type sismique
Etat-limite de service	Les normes NF EN 992 à 1999 utilisent trois combinaisons types selon l'état-limite considéré, - Combinaison type caractéristique (ou rare) - Combinaison type fréquente - Combinaison type quasi-permanente	<i>Pas de vérification</i>	<i>Pas de vérification</i>

Tableau 2. Combinaisons types d'actions à utiliser selon la catégorie de l'état-limite et la situation de projet (source : adapté de la norme NF EN 1990)

J'ai repris les critères de vérification traditionnels en situations normales et exceptionnelles issus de (Aristaghès, 1986) et de matériaux divers (notes de calcul, notes d'hypothèses...) pour différents types d'ouvrage portuaire, que me communiquaient directement les membres du comité de pilotage (cf. section 2.3.1), pour leur donner un sens rigoureux et cohérent avec le format des Eurocodes. Souvent les vérifications en situations normales ont été qualifiées d'ELS et celles en situations exceptionnelles d'ELU. Mais l'extension des Eurocodes au calcul géotechnique et aux ouvrages en site aquatique a permis de démasquer une représentation issue d'une pratique du béton armé avec le BAEL (texte réglementaire antérieur à l'EN 1992 mais déjà au format semi-probabiliste aux états-limites), selon laquelle l'ELU concernerait uniquement la résistance mécanique et l'ELS uniquement la durabilité ou des critères purement fonctionnels d'aptitude à l'usage. C'est ainsi que des critères déplacement d'enrochements de protection ont été qualifiés d'ELU et d'ELS avec des niveaux d'exigence différenciés, que des valeurs limites de déplacements en tête de ducs d'Albe ont été définis tant sous la combinaison fondamentale (ELU) que sous la combinaison caractéristique (ELS), que les coefficients de sécurité prescrits dans certaines vérifications d'ELS de fondations superficielles et profondes (Fascicule 62 titre V, antérieur à l'EN 1997 mais déjà au format semi-probabiliste aux états-limites) ont été requalifiés en « taux de mobilisation » des résistances, car sans relation avec une incertitude à proprement parler sur la valeur des paramètres auxquels ils étaient appliqués.

Le questionnement était intense dans le secteur géotechnique sur la manière dont il allait pouvoir exprimer ses critères de vérifications en termes d'états-limites (Photo 4), et plus généralement s'il allait pouvoir se glisser dans les habits des Eurocodes, initialement taillés pour le calcul de structures. Le calcul des soutènements-plans concentrait à lui seul toutes les interrogations majeures : quel sens donner aux « valeurs caractéristiques » des propriétés des sols ? où placer la pondération par les coefficients partiels, sur les propriétés des sols ou sur les efforts en poussée et butée ? Quel sens donner à un affaiblissement systématique des propriétés du sol alors qu'un paramètre peut jouer dans le sens favorable ou défavorable quand on met en œuvre une méthode élasto-plastique ?

Ma participation à la commission de normalisation française miroir de l'Eurocode 7 comme représentant du STCPMVN entre 1994 et 1998 m'a donné accès aux discussions avec les experts français du domaine. En croisant les idées avec eux, en dégagant des sujets de stage, en introduisant les résultats dans ROSA 2000, j'ai contribué à faire émerger une application des Eurocodes aux ouvrages de soutènement avec des coefficients de valeur et des coefficients de modèle (cf. section 2.2.5), même si les développements normatifs ultérieurs ont fait le choix d'un mode de pondération plus global.



Photo 4. Etat-limite ultime d'un soutènement de berge en Seine à Honfleur, Calvados (Photo : Haropa)

1.1.7 Coefficients de sécurité

En suivant l'approche française du semi-probabilisme (Directives communes de 1979 sur le calcul des constructions), mon travail sur les coefficients de sécurité a exploité la distinction entre les coefficients de valeur et les coefficients de modèle. Les règlements français préfigurant les Eurocodes (BAEL, Fascicule 62 Titre V) avaient en effet introduit un coefficient de modèle γ_{F3} multipliant la sollicitation (ou effet des actions), dont la valeur, d'après (Mathieu, 1975), était de 1,125 pour les structures béton et les fondations, 1,075 pour les structures métalliques (cette valeur étant restée inusitée en France en l'absence de modernisation des CM66, tout l'effort de la communauté ayant porté directement sur la préparation de l'EN 1993).

Mais quelle méthode utiliser pour caler les coefficients de sécurité ?

Beaucoup de travaux étaient disponibles sur les méthodes probabilistes (cf. section 2.1.1), mais celles-ci apparaissaient très spécifiques (offshore, construction métallique, exploitation d'essais à fins normatives), avec peu de possibilité d'en généraliser les résultats à des vastes populations d'ouvrages.

Des essais de modernisation des règles de calcul des ouvrages en site aquatique avaient débuté dans les EAU (Allemagne), les ROM (Espagne), l'actualisation de la norme BS 6349 (UK) et au Japon, mais des notions de base des Eurocodes comme les valeurs caractéristiques et les états-limites restaient

encore floues. Les rapports de (PIANC 1992) proposaient un formalisme compliqué pour les coefficients de sécurité applicables aux hauteurs de houle. On constaterait plus tard que la norme ISO 21650 sur l'action des courants et des vagues (2007) se concentrerait sur les modèles d'action et ne prendrait pas position sur les niveaux de sécurité cible, c'est-à-dire sur les valeurs représentatives des états de mer à prendre en compte. De même le Guide enrochements (Cetmef, 2009) serait un inestimable document sur le dimensionnement des ouvrages à talus et (EurOtop, 2018) sur les franchissements hydrauliques et utiliserait la notion d'état-limite pour le dimensionnement géotechnique (capacité portante, cercles de glissement), mais en resterait aux approches antérieures pour le dimensionnement hydraulique. Il faudrait attendre le projet d'Eurocode 1991-1-8 pour avoir une vraie proposition de périodes de retour pour les valeurs représentatives des états de mer et un élargissement de états-limites aux critères de déplacement ou désorganisation des enrochements de protection des digues à talus.

Cette période de ma vie scientifique m'a conduit à piloter le projet ROSA 2000 (cf. section 2.2.5) et à participer au projet de recherche européen PROVERBS sur le dimensionnement des digues verticales (cf. section 2.2.3). Là encore plusieurs travaux de stagiaires (M2 et écoles d'ingénieurs/travaux de fin d'études) ont permis d'avancer sur ces questions (cf. annexe C), notamment ceux de (Seidlitz, 1996) et (Bonnet, 1997) pour les soutènements-plan, (Marchais, 1997) pour les soutènements-poids, (Linglin, 1997) pour les ducs d'Albe.

1.1.8 Publications

Comme je concentrais mes efforts sur la mise au point de ROSA 2000, les publications dans les revues à comité de lecture n'étaient pas la priorité. Je mentionnerai néanmoins la valorisation dans la Revue française de géotechnique des travaux sur l'approche statistique de détermination des valeurs caractéristiques des propriétés des sols, avec F. Baguelin [11] (cf. section 2.2.2), et ceux sur l'analyse probabiliste du coefficient de modèle pour la résistance ultime des pieux sous charges axiales, avec R. Frank [15] (cf. section 2.2.7), et aussi avec S. Linglin (stagiaire) et E. Longaygue sur la contrainte de référence sous une fondation superficielle [10]. Mais puisque je poursuivais une intense politique de réseautage et de contacts avec des universités, maîtres d'œuvres et bureaux d'études du secteur portuaire pour tester des idées, recueillir des conseils et compléter le panorama des méthodes de prise en compte de l'incertain, de nombreuses communications à des congrès scientifiques ont émaillé cette période et m'ont ouvert à une meilleure compréhension des forces et faiblesses des méthodes en vigueur.

1.2. Etude des barrages de navigation et des barrages de retenue (1996–2006)

1.2.1 Barrages de navigation

Le travail sur les quais portuaires s'est d'abord étendu aux barrages de navigation. Ces ouvrages sont complexes en termes d'actions et d'interaction eau-structure (c'est le cas également des écluses, portes anti-tempête, ponts-canaux et autres ouvrages de franchissement de chute). Adossés à une écluse sur les fleuves et rivières « canalisés » (par opposition aux fleuves et rivières « à courant libre »), ils permettent de maintenir le niveau d'eau du bief amont dans une étroite plage de variation, dite « niveau de consigne », pour que les bateaux chargés naviguent sans difficulté ni de tirant d'eau (pour peu que les fonds de la rivière soient correctement entretenus) ni de tirant d'air (au passage sous les ponts). La régulation est obtenue par le mouvement d'une ou plusieurs « bouchures mobiles » (vannes de barrage) qui s'opposent partiellement à l'écoulement de l'eau et s'ajustent en permanence au débit

fluvial. Bien sûr en cas d'étiage sévère, quand les bouchures sont levées au maximum, le niveau d'eau amont peut descendre en-dessous du niveau normal de navigation, et en cas de grosse crue, quand les bouchures sont totalement effacées, le niveau d'eau amont peut monter au-dessus du niveau normal de navigation, ce qui interrompt la navigation.

Le réseau fluvial géré par Voies navigables de France comprenant un important parc de barrages anciens « à aiguilles » (une cinquantaine) sur le réseau navigable (Photo 5). Les bouchures sont constituées de centaines de pieux en bois d'une dizaine de cm de large pour 2,5 m de long (les aiguilles) posés les uns à côté des autres et manœuvrés avec des moyens sommaires par les barragistes se déplaçant sur une passerelle qui surplombe la rivière. La reconstruction de ces barrages datant du XIX^e siècle était indispensable, à la fois pour des raisons de sécurité du personnel (la manœuvre est pénible et risquée, elle demande des efforts musculaires dans des positions non ergonomiques), d'efficacité hydraulique (la régulation hydraulique est plus efficace quand la bouchure est vraiment étanche) et d'efficacité opérationnelle (le fonctionnement du barrage peut être automatisé). Il m'a été demandé de valoriser mon expérience sur les Eurocodes pour moderniser les méthodes de dimensionnement des barrages de navigation.



Photo 5. Exploitation du barrage à aiguilles de Larçay, Indre-et-Loire (Photo : ParenthèsesUrbaines)

Dans un partenariat avec la société Coyne et Bellier (devenue Tractebel) et bénéficiant de l'expérience des collègues du STCPMVN, j'ai appliqué la même démarche que pour les ouvrages portuaires (cf. section 2.2.6, où l'on présente une photo d'un barrage de navigation de conception actuelle).

Les incertitudes affectant les *actions* ont été analysées : débits fluviaux, efforts de manœuvre et d'appui venant des mécanismes des bouchures mobiles et reportés sur le génie civil. L'appréhension de ces derniers n'était pas immédiate : étaient-ce des actions ou des réactions ? la forte variabilité des

efforts à cause du mouvement des bouchures était-elle assimilable à de l'incertitude ? Comment prendre en compte les actions hydrodynamiques sur les vannes, les variations des efforts de manœuvre sur les parties mobiles et les appuis fixes, les actions transitoires causées par l'écoulement tourbillonnaire autour des vannes, les variations des gradients de sous-pressions sous le radier ? En effet, de même que la variabilité du niveau marin dû à la marée astronomique est un phénomène déterministe auquel se rajoute une composante aléatoire due aux vents et à la pression barométrique, la variabilité des efforts de manœuvre dépend de la consigne de régulation du niveau d'eau amont, dont la partie aléatoire vient des débits fluviaux.

Les *critères de dimensionnement*, les niveaux de sécurité traditionnels et les coefficients globaux de sécurité ont été identifiés. La distinction est apparue entre le dimensionnement du génie civil et des fondations, le dimensionnement des enrochements, le dimensionnement hydraulique. On pouvait clairement s'inspirer des Eurocodes pour le dimensionnement du génie civil et des fondations, bien que les barrages ne fassent pas partie de leur champ d'application. Le dimensionnement des enrochements n'était pas du tout couvert par les Eurocodes (il faudrait attendre les travaux de l'EN 1991-1-8 dans les années 2020 pour que le sujet commence à être abordé). Et que penser du dimensionnement hydraulique, dont l'enjeu est de positionner le ressaut hydraulique à l'aval du barrage et que le lit de la rivière soit protégé sur une longueur suffisante par les enrochements ? Cela devait-il rentrer dans le champ des Eurocodes ? On commençait à exhiber peut-être une nouvelle catégorie d'états-limites, ni ELS ni ELU, les *états-limites fonctionnels* (ELF). De même, dans la conception des ports, des critères d'agitation admissible sont introduits indépendamment de la sécurité propre des ouvrages, pour permettre le chargement/déchargement des navires au calme et sans risque. On est bien en-dehors des Eurocodes.

Des nouvelles *situations de projet* ont été proposées par référence aux débits fluviaux, avec une situation durable dans la plage de régulation, deux situations transitoires d'étiage sévère et de crue sévère, une situation transitoire de maintenance des bouchures mobiles dans laquelle deux batardeaux provisoires appuyés sur le génie civil obstruent la passe du barrage en amont et en aval pour retenir les eaux et dégager la bouchure qui peut alors être déposée, vérifiée, réparée et remise en place, puis les batardeaux sont enlevés.

Les *valeurs caractéristiques* des actions ont été proposées, en distinguant le cas où l'effort de manœuvre résulte d'un calcul d'équilibre de la structure mobile, où il résulte du tarage de l'organe de manœuvre, où il est donné directement dans la définition de la situation de projet (par exemple dans une situation transitoire d'épreuve de l'ouvrage et ses parties mécaniques, ou dans une situation accidentelle liée à la valeur maximale, « accidentelle », de l'effort de manœuvre, au-delà de l'effort de tarage).

Enfin la chaîne des justifications a été bouclée en donnant les valeurs des *coefficients de modèle* par états-limites ultimes, appliqués aux sollicitations, dont la mise en œuvre avec les coefficients de valeur des Eurocodes appliqués aux paramètres représentatifs des actions permettait de retrouver les mêmes dimensionnements, c'est-à-dire les mêmes quantités de matériaux, c'est-à-dire les mêmes coûts de construction, que par les méthodes traditionnelles utilisant les coefficients globaux de sécurité.

Ces travaux ont été directement incorporés dans le Guide du chef de projet de barrage mobile [1] dont j'ai assuré le pilotage d'ensemble, en sus de la rédaction du chapitre 8 et de l'annexe 2 qui détaille la méthode de justification compatible avec les Eurocodes et reprend les travaux menés en partenariat

avec Coyne et Bellier. Ils ont également été incorporés dans les fascicules *ad hoc* de ROSA 2000 [3] sur les barrages, les écluses (dans une collaboration avec la Compagnie nationale du Rhône) et sur les efforts de manœuvre et d'appui (dans une collaboration avec la société d'ingénierie ISL).

J'ai eu la joie de voir ROSA 2000 référencé dans le cahier des charges de l'appel d'offres pour les travaux d'agrandissement des écluses du canal de Panama (Photo 6).



Photo 6. Portes coulissantes des nouvelles écluses du canal de Panama (Photo : EPA / Alejandro Bolivar)

1.2.2 Barrages de retenue

Les contacts que j'avais noués sur les barrages mobiles m'ont invité à élargir mes recherches en direction des barrages de retenue hydro-électriques ou agricoles, dans le cadre d'un groupe de travail du Comité français des grands barrages piloté par le Cemagref (maintenant INRAe). L'expérience acquise sur les ouvrages portuaires et les barrages de navigation a facilité mon insertion dans le groupe, qui était désireux de mieux connaître ces Eurocodes dont on parlait tant !

Le diagramme de la Figure 2 a servi de fil conducteur à la conceptualisation par le groupe de travail du format de sécurité semi-probabiliste aux états-limites. Les méthodes d'analyse de la sécurité des grands barrages ont été questionnées en reprenant les mêmes items que j'ai présentés plus haut : situations de projet, états-limites, valeurs représentatives des actions et des résistances, combinaisons d'actions, coefficients de sécurité partiels.

Un grand intérêt de ces recherches a été de pouvoir mettre en évidence un certain nombre de spécificités des barrages de retenue.

Les trois incertitudes qui dominent la sécurité des barrages de retenue (Photo 7) sont, d'une part, les débits de crue (qui peuvent entraîner des désordres quand les eaux passent massivement au-dessus de la crête du barrage), d'autre part, les propriétés géologiques, mécaniques et hydrauliques de la roche sur laquelle s'appuie le barrage et du massif de sol constitutif du barrage (dans le cas des

barrages en terre), enfin le fonctionnement des organes mécaniques de gestion de niveaux d'eau (évacuateurs de crue, vannes, stations de pompage) (Peyras et *al.*, 2000).

Les enjeux sont particulièrement importants puisqu'ils concernent la protection des populations contre la catastrophe d'inondation en cas de rupture du barrage. Ce volet « sécurité civile » détermine les niveaux de sécurité admissibles.



Photo 7. Barrage de Serre-Ponçon, Hautes-Alpes (Photo : EDF – Benoît Blancher)

Il en découle que les *situations de projet* vont être définies principalement par les niveaux d'eau dans la retenue, eux-mêmes commandés par les débits d'alimentation hydraulique de la retenue qui constituent une variable aléatoire essentielle à l'analyse de la sécurité. On aura ainsi une situation durable dans laquelle le niveau d'eau varie dans une plage de régulation entre la « cote minimale d'exploitation » (CME) et la « cote de retenue normale » (RN) ; une situation transitoire dans laquelle la « crue exceptionnelle » atteint la cote des « plus hautes eaux » (PHE) ; une situation transitoire de vidange ; une situation accidentelle avec une « crue extrême » qui atteint la « cote de danger » ; une situation accidentelle avec la défaillance d'un organe d'évacuation des crues ; et aussi une situation sismique sous le « séisme d'évaluation de la sécurité » et des situations transitoires en cours et en fin de construction (c'est-à-dire avant dissipation des surpressions interstitielles).

Mais quand on raisonne sur des débits ou des niveaux d'eau, l'introduction de coefficients de sécurité devient problématique. Quel est le sens de multiplier une cote ou un débit par 1,35 ou par 1,50, alors qu'une cote dépend du référentiel de mesure et qu'un débit est représenté par sa période de retour ? Il serait déjà plus raisonnable de pondérer une différence de niveaux, mais quel paramètre reflète-t-il le mieux les incertitudes, quel paramètre peut-il être considéré comme une variable aléatoire ? Plutôt qu'un coefficient partiel multiplicatif, ne serait-il pas préférable d'introduire une marge de sécurité

additive (surcote) ? Or dans le format des Eurocodes, la sécurité est prise en compte (je simplifie) par un couple : le coefficient de sécurité partiel, dont la valeur est plus ou moins élevée, et la valeur caractéristique du paramètre à laquelle s'applique le coefficient de sécurité, qui est plus ou moins sécuritaire ; la combinaison des deux forme la « valeur de calcul » qui est utilisée pour la vérification des états-limites ultimes dans les situations durables ou transitoires (c'est la combinaison type fondamentale). Il vient que pour l'action hydraulique sur les barrages de retenue, la notion de coefficient partiel au sens des Eurocodes n'est pas appropriée et qu'il faut élargir le format.

La communauté scientifique des barrages hydrauliques travaillait avec les périodes de retour des crues. Pour répondre aux questions posées dans le paragraphe précédent, c'est en élargissant le concept de valeur de calcul des Eurocodes vers la possibilité d'une *détermination directe* de cette valeur grâce à une analyse statistique de données disponibles sur les débits, et non plus en multipliant la valeur caractéristique par le coefficient partiel, que l'on a pu proposer une approche que je qualifierais de « cohérence faible » avec les normes européennes. Ainsi :

- la fourchette de la CME et de la RN, valeur moyenne du niveau dans le temps, serait normalement désignée par les Eurocodes comme une « valeur quasi-permanente ». On l'assimilera à une valeur de calcul, prise identique à une valeur caractéristique, en situation d'exploitation normale du barrage ; elle est déterminée à la conception sur des critères de fonctions à assurer (production électrique, volume d'eau à préserver, adaptation à la morphologie du site...) ;
- la crue exceptionnelle qui correspond à la cote des PHE, vu les valeurs du Tableau 3, serait normalement désignée par les Eurocodes comme un intermédiaire entre une « valeur caractéristique » et une « valeur de calcul ». On l'assimilera à une valeur de calcul, prise identique à une valeur caractéristique, en situation transitoire ; elle est définie directement par une période de retour qui dépend de la classe du barrage (A, B ou C) et de sa conception (rigide ou en remblai) sans interposition de coefficient partiel de sécurité (Tableau 3).

Classe du barrage	Barrages rigides	Barrages en remblai
A	3 000 ans	10 000 ans
B	1 000 ans	3 000 ans
C	300 ans	1 000 ans

Tableau 3. Périodes de retour de la crue exceptionnelle correspondant à la cote des PHE (en années) pour les barrages créés et les barrages de classes A et B reconstruits (source : [55])

- la crue extrême définit une situation accidentelle : on parlera donc de « valeur accidentelle » et, au vu des valeurs du Tableau 4, elle correspondrait bien à une valeur accidentelle au sens des Eurocodes ; elle est définie directement avec une probabilité d'occurrence annuelle (qui est l'inverse de la période de retour) selon la classe du barrage (Tableau 4).

Classe du barrage	Probabilité d'occurrence annuelle
A	10 ⁻⁵
B	3.10 ⁻⁵
C	10 ⁻⁴

Tableau 4. Probabilité d'occurrence annuelle de la crue extrême correspondant à la cote de danger pour les barrages créés et les barrages de classes A et B reconstruits (source : [55])

- la crue à prendre en compte dans la situation accidentelle de défaillance d'un organe d'évacuation des crues serait désignée par les Eurocodes comme une « valeur fréquente » (combinaison type accidentelle) ; mais à supposer que la défaillance d'un organe d'évacuation des crues définisse une situation transitoire, la crue à prendre en compte serait une « valeur de combinaison de calcul » (combinaison type fondamentale). L'arrêté du 6 août 2018 prescrit pour la période de retour de cette crue les valeurs du Tableau 3.

Une analyse comparable pourrait d'ailleurs être menée sur les digues fluviales. Bien que leur hauteur de retenue soit certes moindre que celle des barrages ci-dessus, leur rupture (souvent localisée), peut avoir des conséquences tout à fait significatives pour les personnes, les activités et les biens.

Cette expérience m'a enseigné que la transposition de règles de sécurité des Eurocodes pouvait trouver des limites. Effectivement la sécurité des barrages de retenue répond à un impératif de sécurité civile, plus contraignant que celle des ouvrages portuaires ou fluviaux (pour lesquelles prévalent les considérations économiques, exploitation des services logistiques et de transport, mais aussi écologiques et environnementales). Dans la suite, la communauté barragiste a souhaité délibérément rester en dehors de la famille Eurocodes, au contraire des ouvrages maritimes qui sont actuellement en train de la rejoindre.

En sus du rapport du groupe de travail du CFGB, ces analyses ont fait l'objet de plusieurs publications. Ils ont été pris en compte dans l'élaboration du texte réglementaire de 2018 par le ministère de la transition écologique (direction de la prévention des risques), à la rédaction de laquelle j'ai collaboré [55].

A la suite de ces études le temps ne m'a pas permis de poursuivre ma participation aux Eurocodes géotechniques. Je n'ai donc pas suivi personnellement la « 2^e génération » des Eurocodes, ni l'écriture des normes françaises d'application. Mais je pense que mes travaux, notamment [11], [12] et [15] ont été utiles et ont pu avoir une influence sur les choix qui ont été faits dans les commissions de normalisation compétentes.

1.3. Croisement des approches de l'incertain avec le calcul socio-économique (2008-2011)

Mon passage dans l'administration centrale du ministère chargé des transports (direction générale des infrastructures, des transports et de la mer) en tant que sous-directeur des transports maritimes et fluviaux (2007-2008), puis sous-directeur des études et de la prospective (2008-2011), et ensuite comme adjoint au directeur général (2011-2015), qui m'a fait connaître une belle expérience d'interdisciplinarité. Après avoir étudié la sécurité des constructions, j'ai exploré les risques et incertitudes dans le calcul socio-économique des projets d'investissement.

1.3.1 Analyse socio-économique des projets

Prenons un projet d'investissement, par exemple la construction et l'exploitation d'une nouvelle ligne de transport en commun, ou le dragage d'un chenal de navigation pour augmenter le tonnage des navires qui l'empruntent. Le coût d'investissement initial est noté I_0 . Les produits annuels d'exploitation sont notés P_t . Les charges d'exploitation annuelles sont notées C_t . Le taux d'actualisation noté r exprime le fait qu'un euro demain vaut moins qu'un euro aujourd'hui. La *valeur actualisée nette* du projet, ou VAN, est la somme des flux économiques annuels (positifs et négatifs) sur toute la vie du

projet en tenant compte de dépréciations d'autant plus fortes que les flux économiques interviennent loin dans le temps. En prenant comme hypothèses simplificatrices que r ne dépend pas du temps t (qui représente la succession des années), la VAN du projet s'écrit sous la forme classique (Eq. 2) (Commissariat général au plan, 2005) et [54] :

$$VAN = -I_0 + \sum_t \frac{P_t - C_t}{(1+r)^t} \quad (2)$$

Les calculs de VAN sont importants pour la décision d'investissement car les projets les plus rentables sont ceux dont la VAN est la plus forte. Dans une optique d'aide à la décision publique sous contrainte budgétaire, on classe les projets par ordre décroissant du rapport VAN/I_0 , c'est-à-dire la valeur actualisée nette par euro investi. Il apparaît que la VAN est très sensible à la valeur du taux d'actualisation, r .

On distingue :

- la VAN financière, dans laquelle seuls les flux financiers sont pris en compte (*cash flows*) et r est le « taux d'actualisation financier ». Par définition le taux de rentabilité financier est la valeur de r qui annule la VAN. On investit le montant I_0 dans le projet si le taux de rentabilité financier est supérieur au taux d'intérêt long terme du marché auquel on souscrirait l'emprunt de I_0 ;
- la VAN socio-économique, dans laquelle tous les avantages et inconvénients socio-économiques apportés par le projet (externalités positives et négatives) sont monétarisés en sus des flux financiers et incorporés dans le calcul des charges et des produits, comme les accidents de la route, la pollution de l'air, le bruit pour les riverains, l'accessibilité aux espaces et aux services qui y sont rendus, le temps passé dans les transports, etc. On utilise le « taux d'actualisation socio-économique ». Un projet apporte de la valeur à la collectivité, et la puissance publique est légitime à le mettre en œuvre, si sa VAN est positive.

Estimé d'abord à 6 %, le taux d'actualisation socio-économique avait été relevé à 8 % en 1985 pour tenir compte de l'incertitude sur la croissance économique. Cette valeur a fait ensuite « l'objet de contestations assez fortes, notamment parce que son usage conduisait mécaniquement à minorer considérablement ce qui se passe dans un futur éloigné ». En 2004 à la suite du rapport Lebègue (Commissariat général du Plan, 2005), la valeur du taux d'actualisation a été ramenée à 4 %, hors prime de risque, en précisant que le taux d'actualisation devait décroître avec le temps à partir de 30 ans pour atteindre 2 % à un horizon de 500 ans, mais sans pouvoir passer en-dessous (ce qui excluait la nullité du taux d'actualisation).

Au moment où j'ai commencé à travailler sur ces sujets, le ministre chargé du développement durable avait chargé le Centre d'analyse stratégique (anciennement Commissariat général du Plan, maintenant France Stratégie) de mettre en place une « *commission d'experts en théorie de la décision en situation d'incertitude ainsi que de l'évaluation socio-économique et environnementale* » afin d'arriver à « *une prise en compte dynamique de l'incertitude et de la valeur de l'information ainsi que de l'aversion au risque et de la façon d'apprécier les irréversibilités.* » Il s'agissait en fait de compléter les travaux de la commission Lebègue pour définir de la meilleure manière possible les primes de risque complétant le nouveau taux d'actualisation de base de 4%.

J'ai eu l'honneur d'être nommé membre de cette commission du CAS dont la présidence a été confiée au Pr. Christian Gollier (Toulouse School of Economics), qui s'est réunie entre 2009 et 2010. Les

résultats des recherches des équipes des domaines concernés dont certaines étaient présentes dans la commission Gollier (ENPC/CERMICS, TSE, ENPC/CERAS), ont pu nourrir mes réflexions dans l'établissement des modes de calcul des incertitudes et des risques.

1.3.2 Distinction entre risque et incertitude

Participer à cette commission m'a permis de prendre un nouveau recul par rapport au traitement de l'incertain tel que j'avais pu le pratiquer avec les Eurocodes.

En effet les économistes et les financiers distinguent le risque (*risk*) qui concerne les événements et circonstances auxquels des distributions de probabilité ou des processus aléatoires peuvent être assignés, et l'incertitude (*uncertainty*) qui traduit un état d'ignorance beaucoup plus profond où il n'est plus possible de définir des distributions de probabilité. Les fluctuations interannuelles de la croissance du PIB relèvent du risque (ou incertitude ordinaire), les chocs (conflits armés, faillite Lehman Brothers...) relèvent de l'incertitude (ou incertitude radicale, *black swans*). Les ouvrages (Dixit et *al.*, 1994) et (Quiry et *al.*, 2005) explicitent ces notions.

En transposant au dimensionnement des ouvrages de génie civil, on dirait que le risque affecte la variabilité de paramètres dont les lois de variation sont connues ou à tout le moins atteignables : la vitesse du vent, la hauteur des houles, la vitesse d'accostage des navires, les accélérations sismiques, les paramètres de résistance au cisaillement au sein d'une couche de sol homogène et reconnue par un nombre suffisant de sondages et d'essais ; que l'incertitude caractérise des aléas comme le changement de la nature du trafic sur un quai et les modifications des charges d'exploitation qui en sont la conséquence (au gré des évolutions économiques et commerciales), les chocs de navires contre les piles de pont, les changements brutaux de faciès géologique dans un terrain insuffisamment reconnu, etc.

La stratégie de l'économiste en présence de risque utilise les outils mathématiques. Il pourra s'agir de maximiser l'espérance de la valeur du portefeuille d'actifs, ou de minimiser la *Value at Risk* (définie comme un fractile, par exemple 10%, de la distribution de probabilités des valeurs du portefeuille). La gestion d'un portefeuille d'actifs se traduit par le calage d'une « prime de risque » dans le calcul de la VAN des projets.

J'ai analysé la stratégie des Eurocodes avec ces nouvelles « lunettes ». En génie civil, la notion d'espérance de survie d'un ensemble d'ouvrages ne serait clairement pas acceptable : quel aménageur se contenterait que la moitié seulement, ou même 10%, des bâtiments de son parc immobilier reste en bon état ? L'analogie est imparfaite, certes, mais elle montre que le critère décisionnel ne peut que concerner chaque ouvrage individuellement. Au lieu de minimiser une espérance de risque, les Eurocodes fixent une probabilité inacceptable de ruine. C'est l'approche probabiliste des Eurocodes dont les bases sont décrites dans l'annexe C de l'EN 1990. Vu qu'un ouvrage peut connaître plusieurs modes de défaillance et que celles-ci emportent des enjeux plus ou moins sensibles, les seuils de probabilités ou probabilités admissibles sont déterminées non globalement mais pour chaque état-limite, et elles sont différenciées selon que l'état-limite relève de la catégorie des ELS ($1,4 \cdot 10^{-3}$ par an) ou des ELU ($1,5 \cdot 10^{-6}$ par an). Alors que l'approche des Eurocodes est donc basée sur la limitation de l'exposition au risque de chaque projet individuellement et se traduit par des coefficients de sécurité calés par référence à des probabilités admissibles de défaillance.

En présence d'incertitude (radicale, profonde), l'économiste est démuni : « *dans de telles situations il est essentiel que l'évaluateur se concentre sur l'obtention d'informations supplémentaires (de nature scientifique, ou des données de terrain) pour affiner la quantification de ces incertitudes. Lorsque l'événement est lui-même inconcevable, il n'y a rien à faire sinon chercher à améliorer constamment les méthodes d'évaluation et de prévision, pour que l'inconcevable devienne de l'imprévisible, voire du prévisible* » (Commissariat général au plan, 2005).

En revanche le format des Eurocodes donne une place à la prise en compte des incertitudes plus radicales. En tant que tel le format n'apporte pas plus d'informations sur des futurs qui demeurent incertains. En revanche il invite le projeteur à bâtir des *scénarios* : par exemple, évolution des trafics, augmentation de la taille des navires de projet, intérêt à concevoir un terminal polyvalent, anticipation des conséquences du changement climatique, préservations des possibilités d'un rempiètement ultérieur d'un quai, etc. ; à chiffrer les surcoûts d'investissement correspondant, à sélectionner les scénarios acceptables avec la maîtrise d'ouvrage et à les intégrer dans le cahier des charges en comme autant de situations de projet.

Par ailleurs les Eurocodes reconnaissent que les facteurs non probabilisables de ruines et pathologies sont plus nombreux que ceux qui sont probabilisables. Aussi une large part est-elle donnée aux dispositions constructives et aux prescriptions sur les matériaux (normes européennes sur les matériaux) pour assurer une réserve de sécurité et de durabilité.

1.3.3 *Analyse des risques et notion de risque admissible*

Après avoir assisté à la quasi-totalité des réunions de la commission Gollier et participé à la relecture du rapport final préparé par les deux rapporteurs (L. Baumstarck, université de Lyon, et P. Féry, direction du Trésor), ma curiosité m'a entraîné vers d'autres domaines pour compléter ma collection d'approches des risques. J'étais poussé dans ces investigations par les étudiants devant lesquels j'intervenais tous les ans (cf. section 1.5) et qui manifestaient le souhait de mieux comprendre la position des Eurocodes au sein de la *gestion des risques*.

Mes supports de cours ont ainsi été restructurés avec une présentation plus générale de la notion d'état-limite et de coefficient de sécurité, conduisant, je l'espère, à une meilleure compréhension par les étudiants de la méthode « Eurocodes ».

J'ai réanalysé la notion d'état-limite avec le « diagramme de Farmer » (Figure 3). A partir d'une définition basique du risque comme le produit d'une probabilité d'occurrence (ou aléa, ou fréquence sur la Figure 3) de l'événement non souhaité et des conséquences de celui-ci (ou enjeu, ou gravité sur la Figure 3) avec une dimension en euros, ou en pertes de vies humaines, la distinction entre les ELS et les ELU apparaît alors d'une manière nouvelle et pédagogique. A niveau de risque identique, un ELU correspond à un très fort enjeu et une probabilité admissible très faible, une ELS correspond à un enjeu plus modéré et une probabilité admissible qui pourra être un peu plus élevée que la précédente.

La version « discrète » du diagramme de Farmer est le tableau Fréquence / Gravité tel que mis en œuvre couramment dans les analyses de risque.

En sus d'une illustration des méthodes usuelles d'analyse des risques (arbre des causes et des conséquences, nœud papillon), j'ai présenté à mes étudiants les possibilités de raffinement du modèle

de base « risque = aléa x enjeu » (pour aller plus loin que « la prévention consiste à réduire l'aléa, la protection à réduire la vulnérabilité »), par l'introduction :

- de la détectabilité des précurseurs de l'aléa et de la cinétique de l'événement non souhaité (risque industriel) ;
- d'une phase de propagation de l'aléa, avec la distinction entre protection active (initiation de l'aléa) et protection passive (propagation) (domaine des chutes de blocs) ;
- d'une phase de traitement post-crise, après survenance de l'événement non souhaité, avec la distinction entre prévention, protection et curatif (domaine de la santé-sécurité au travail) ;
- du concept de dissuasion (risques intentionnels) avec une rétroaction de la vulnérabilité sur l'aléa (un coffre-fort bien solide réduit la probabilité d'une tentative de vol, mais une barrière anti-tsunami n'a aucune influence sur le séisme initiateur).

Par exemple, la méthode de (Kinney & Wiruth, 1976) utilisée couramment en Belgique. Le risque est défini comme le produit de trois facteurs qui sont des approches subjectives de la probabilité d'occurrence (cotée de 0,1 à 10), de la fréquence d'exposition (cotée de 0,5 à 10) et la gravité des conséquence (cotée de 1 à 40).

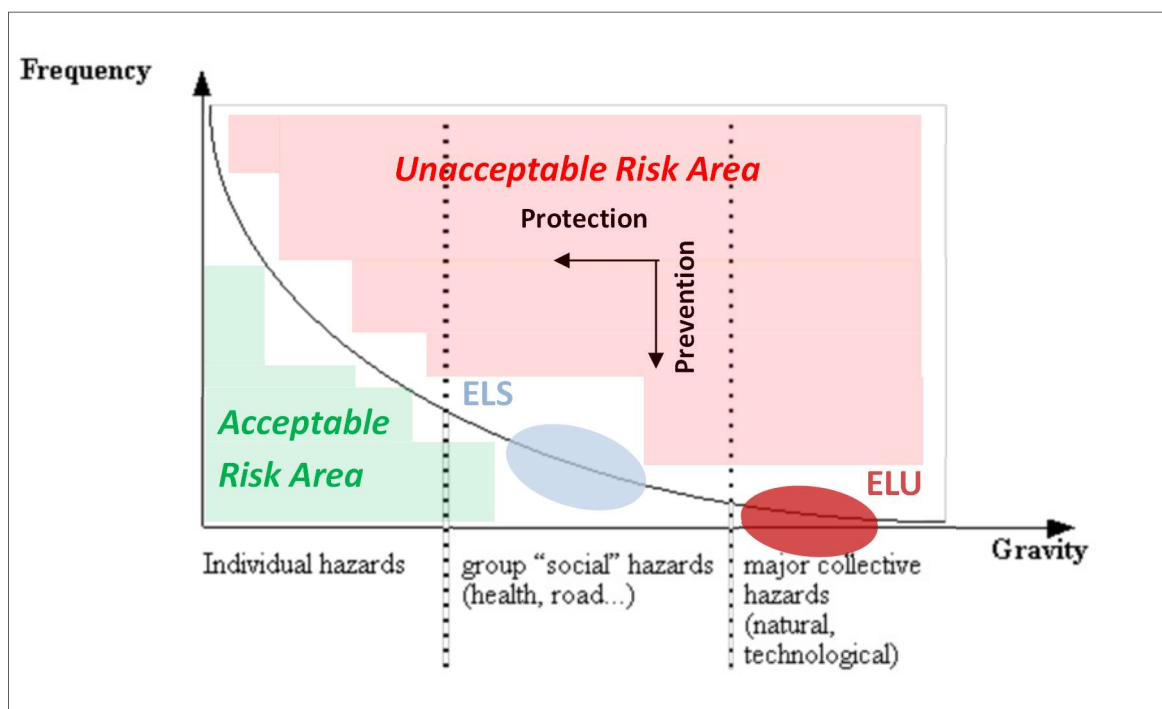


Figure 3. Etats-limites et diagramme de Farmer (source : Le risque majeur, Secrétariat d'Etat chargé de l'environnement et de la prévention des risques technologiques et naturels majeurs, août 2001 + compléments propres)

Ce tableau étant posé, une question revenait tous les ans : comment détermine-t-on la valeur du risque admissible (ou autrement dit comment place-t-on la séparation, dans le diagramme de Farmer, entre les points admissibles et les points inadmissibles) ?

Question redoutable. J'ai exploré quelques éléments de la littérature (Vrijling, 1992) et (Vrijling et al., 1995), d'où il ressortait en substance quatre grandes approches du risque admissible :

- l'observation des comportements individuels d'exposition au risque (sports, loisirs, vie courante) ;
- le débat socio-politique, à l'issue duquel une relation admissible fréquence / gravité est promulguée pour certains types de risques (installations industrielles, infrastructures de transport) ;
- l'optimum économique, dans lequel, au cas par cas, on détermine le niveau de protection qui minimise le coût global de l'ouvrage (coût de construction + espérance du coût de remise en état) ;
- et finalement l'approche rétrospective historique, par laquelle on collecte (ou on recalcul) les niveaux de protection exhibés par une population d'ouvrages existants réputés convenir.

Mon expérience des discussions en commissions de normalisation et groupes de travail me fait privilégier cette dernière approche. D'après moi, dans le domaine de la construction en tout cas, toute nouvelle génération de code ou règlement de calcul a été testée pour s'inscrire globalement en continuité des niveaux de dimensionnement antérieurs (exemple : nos méthodes de calage des coefficients de modèle) avec le renforcement des exigences là où des sinistres ou pathologies ont été rencontrés (exemple : ferrailage de peau des éléments en béton armé, augmentation du ferrailage pour une meilleure durabilité).

Au final, le taux d'actualisation socio-économique a été donné par la formule :

$$r = 1,2\% + \beta \times 2\% \quad (3)$$

où 1,2% est le taux sans risque, 2% est la prime de risque (qui dépend de la concavité de la fonction d'utilité de la richesse collective, réputée liée au degré d'aversion collective au risque) et β est non l'indice de fiabilité au sens des Eurocodes, mais un coefficient représentant la sensibilité des bénéfices futurs du projet au PIB par habitant (sur un plan théorique, quand les flux économiques suivent au cours du temps une tendance constante affectée de chocs aléatoires indépendants – hypothèse de mouvements browniens géométriques – β est la covariance du taux de croissance annuelle du PIB par habitant et du taux de croissance annuel des flux générés par le projet, divisé par la variance taux de croissance annuelle du PIB par habitant).

A côté de la valorisation de ces réflexions sur l'incertain dans mes interventions pédagogiques, les résultats du rapport Gollier [50] ont servi, avec d'autres apports bien sûr, à l'Instruction du Gouvernement du 16 juin 2014 *relative à l'évaluation des projets de transport* dont j'ai coordonné la rédaction [54] et qui, après actualisations par mes successeurs, est toujours en vigueur aujourd'hui.

A ce domaine peuvent se rattacher indirectement mes productions de *policy briefs* sur la résilience des infrastructures. J'ai notamment coordonné de 2019 à 2021 la rédaction de trois contributions successives au T20, le groupe d'intérêt « think tanks » du G20, abordant les problématiques de la construction, de la maintenance et de l'évaluation [32], [34], [36]. Ces textes étant signés par un groupe très international (et à géométrie variable au fil des années), le rôle de coordonnateur est d'abord d'amener les participants au consensus sur le plan et les grandes lignes des futurs messages à délivrer (*policy recommendations*), puis d'écrire la plus grande partie du document, d'introduire les contributions des co-auteurs même celles qui s'écartent le plus du plan initialement fixé, de prendre

en compte les remarques des relecteurs, enfin de faire valider le document final après avoir négocié un délai supplémentaire avec le secrétariat.

1.4. Elargissement des Eurocodes aux ouvrages côtiers (depuis 2018)

Le mandat M515 de la Commission européenne (2012) a enrichi le programme de travail du CEN pour élaborer plusieurs nouvelles parties d'Eurocodes, dont une sur les actions des courants et des vagues sur les structures côtières.

Pris pas d'autres activités j'avais suspendu mes travaux sur les Eurocodes. Mais peu de temps après le début du groupe de travail CEN/TC 250/SC 1/WG 6, le Cerema m'a proposé d'intégrer ce groupe pour y apporter une expertise sur le format des Eurocodes et ses fondements, format qui se révélait aux autres membres du groupe vraiment très éloigné des méthodes de dimensionnement hydraulique.

Une vingtaine d'années après PROVERBS, j'ai donc été nommé membre de groupe de travail de normalisation : le moment était venu, avec davantage d'expérience de ma part, de transférer ces connaissances dans le texte européen (cf. section 2.2.4).

1.4.1 *Faire le pont entre deux univers scientifiques : Eurocodes et calcul hydraulique*

Selon les termes du *New Work Item Programme* (NWIP), le but était de reprendre la norme ISO 21650 :2007 sur l'action des courants et des vagues pour la rendre compatible avec les Eurocodes et faire rentrer les ouvrages côtiers dans la grande famille des ouvrages justifiables avec les Eurocodes.

Le travail s'est révélé considérablement plus compliqué que prévu. Je crois pouvoir dire que j'ai joué un rôle déterminant dans l'aboutissement du projet grâce à la confiance que m'ont témoigné les experts actifs dans le groupe (France, Grèce, Royaume-Uni, Pays-Bas, Norvège), le président du groupe et le secrétariat (norvégiens).

Quelles en étaient les raisons ?

Tout d'abord, la méconnaissance du format des Eurocodes : la première version du projet de norme était fortement inspirée de la BS 6349 avec la promotion de méthodes de justification aux coefficients de sécurité globaux des méthodes probabilistes, très éloignées de la méthode aux coefficients partiels des Eurocodes. L'incompatibilité de cette première version avec le mandat a été mise en évidence par le groupe chargé de superviser les travaux (CEN/TC 250/SC 10 MG) présidé par P. Formicchi et a nécessité un large travail d'adaptation des pratiques existantes, telles que présentées dans des textes de référence comme le Rock Manual ou l'EurOtop, et la recherche d'un consensus dans la fixation des niveaux de sécurité.

Une autre difficulté venait de la diversité des sources d'incertitudes obérant l'appréciation des actions de la houle sur un caisson ou un talus protégé par des enrochements : incertitudes sur les intensités et les occurrences des tempêtes (dites incertitudes de long terme), sur les hauteurs et périodes de vagues pendant une tempête (dites incertitudes de court terme), sur l'estimation statistique des distributions des tempêtes à partir d'un échantillon de taille finie (dites incertitudes d'échantillonnage), dispersion des résultats des essais sur modèles réduits physiques d'où sont dérivées les formules de calcul utilisées pour les prédimensionnements, les effets parasites liés au choix des similitudes et aux effets d'échelle, sur les résultats des modèles numériques obérés par les simplifications des équations de Navier-Stokes, sur les corrélations entre les paramètres (hauteur de houle, période de houle, niveau

d'eau, vitesse du vent), enfin sur le changement climatique. Le projet de norme a dû proposer des règles pour chacune d'entre elles, en indiquant des périodes de retour des tempêtes en relation avec les valeurs représentatives des actions (périodes de retour caractéristiques, de calcul, fréquentes, quasi-permanentes, de combinaison, accidentelles), en introduisant la notion de période de retour jointe de deux paramètres d'action.

La notion *d'état-limite* a dû être débattue et précisée jusqu'à obtention d'un consensus au sein du groupe.

Par ailleurs l'interprétation du mandat a donné lieu à des discussions sur la portée à donner à la norme. Relevant de l'Eurocode 1, celle-ci n'aurait dû en théorie n'aborder que les actions, leurs modèles de calcul et leurs valeurs représentatives, et s'interdire d'aller dans le champ des états-limites et des résistances qui relèvent des Eurocodes 2 et suivants. Cette position a dû être infléchie à la demande du CEN/TC 250/SC 10 MG, par ailleurs en charge de la révision de l'EN 1990, qui demandait que le groupe de travail responsable des actions des courants et de vagues rédige une annexe à l'EN 1990 sur les ouvrages côtiers.

Ces difficultés ont été renforcées par une application exigeante de l'EN 1990 par le CEN/TC 250/SC 10 MG et une longue recherche des voies permettant de se raccorder, dans la mesure du possible, à la pratique de l'ingénierie hydraulique.

Il faut rappeler que ces débats ont eu lieu pendant l'épidémie de Covid-19 donc à distance. Les réunions en visio-conférence sont certainement intéressantes dans la gestion de tâches connues et régulières, elles se révèlent d'une moindre efficacité pour la créativité et la résolution de problèmes, de plus en contexte multi-culturel !

1.4.2 *Valorisation dans l'univers des normes*

J'ai rédigé le *background document* du projet de norme [7]. Ce document sera publié au moment de l'enquête à lancer par le CEN en 2024 auprès des organismes nationaux de normalisation. Ces travaux sur l'adaptation du format des Eurocodes au dimensionnement hydraulique des ouvrages côtiers sont donc récents. Ils viennent d'être valorisés dans une communication au congrès ICE Breakwaters (avril 2023, Portsmouth, Royaume-Uni) [30] et aux Meddays de l'AIPCN (octobre 2023, Sète) [31]. Par ailleurs un travail en cours en France de comparaison des approches traditionnelle pour préparer la position collective des acteurs français à l'enquête.

D'ores et déjà on peut s'attendre à des débats animés. Les questions qui ont suivi ma présentation à Portsmouth montrent combien un long travail d'explication et de « pontage » reste à réaliser pour amener la communauté de l'ingénierie hydraulique à accepter le changement de formulation dans la prise en compte de l'incertain.

Le changement climatique, pourtant la cause d'une évolution du climat maritime beaucoup plus significative pour les dimensionnements des ouvrages que la mise au point fine des périodes de retour cibles, a été assez peu discuté au sein du groupe, même si la nécessité de le prendre en compte a été rappelé avec insistance et à de nombreuses reprises au fil du texte (la prise en compte du changement climatique est en tout état de cause un objectif transversal du programme des Eurocodes de 2^{ème} génération). Les clauses relatives à la prise en compte du changement climatique ne sont pas dénuées d'intérêt toutefois. Elles opèrent la distinction entre les ouvrages adaptables ou remplaçables pour

lesquels on considère les conditions régnant au moment de la première opération de maintenance ou à défaut au 2/3 de la durée de vie de l'ouvrage, et les ouvrages ni adaptables ni remplaçables pour lesquels on considère les conditions régnant en fin de vie (en supposant bien entendu que les conditions les plus sévères sont celles à venir).

Ci-dessous quelques extraits des commentaires oraux ayant suivi ma présentation, relatés dans les *Proceedings* (en cours de publication).

"Normally, when I start designing a project, I have design basis and design criteria. The design basis deals with the stability and integrity of the structure, whereas the design criteria are dealing with the performance of the structure, for example an acceptable rate of overtopping or wave agitation inside a harbour basin. Mixing between these two sets of requirements is confusing and may have some undesirable results." (L. Mohammad, COWI).

"I would like to know more about the Eurocodes as the above "geotechnical/structural" concepts are difficult for me to grasp in the context of coastal engineering." (N. Genovese, COWI).

"We are a little bit reluctant to use partial safety factor 1.35 but still, I would like to support you." (J. van der Meer).

"I'm fascinated by this discussion, although I find it anachronistic and backward looking to some extent. International design standards have been evolving for decades towards what essentially is a 'new' paradigm: the concept of designing to reduce risk, by achieving an adequate level of safety (or in other words 'a low enough probability of failure') during the life cycle of the structure/infrastructure." (G. Cuomo, Studio Speri).

Je reste persuadé qu'il y a beaucoup d'avantages – notamment en termes de sécurité dans la conduite de projets – à parler le même langage entre les communautés structurales, géotechniques et hydrauliques.

1.5. Enseignement et animation scientifique (depuis 2001)

1.5.1 Interventions régulières en université et école d'ingénieurs

La transformation des méthodes de calcul des ouvrages portuaires pour les amener au plus proche des Eurocodes a donné lieu à de nombreux travaux de stage s'étalant sur plusieurs années universitaires. Le découpage en sujets ciblés (l'étude de telle action, de tel type de quai) permettait de déposer des offres de stages de DESS (maintenant M2) ou à des travaux de fin d'études pour les écoles d'ingénieurs. J'ai ainsi mobilisé les contacts du STCPMVN avec l'enseignement supérieur pour recruter des stagiaires. Les sujets considérés comme originaux intéressaient également les encadrants académiques. Après quelques années ceux-ci m'ont demandé d'intervenir dans leurs formations.

J'ai donc commencé à intervenir au niveau M2 à l'université de Caen et à l'université du Havre dès avant la publication de ROSA 2000 pour sensibiliser les étudiants à la question de la sécurité dans le dimensionnement des ouvrages (cf. section 2.5.1). Le contenu de mes cours a évolué au fur et à mesure que le format des Eurocodes se précisait, notamment l'Eurocode 7. Comme je l'ai dit plus haut les échanges avec les étudiants ont été très formateurs pour moi-même. Les étudiants habitués dans leurs projets à appliquer les normes et codes de calcul sans trop se poser de question se montraient très intéressés à découvrir « l'envers du décor » : comment fonctionne une commission de normalisation ?

pourquoi les coefficients 1,35 sur les actions permanentes et 1,50 sur les actions variables (« 1,35 G + 1,50 Q ») ? pourquoi prend-on par défaut $\psi_0 = 0,77$? est-ce qu'il faut commencer par calculer à l'ELS ou à l'ELU ? comment s'est-on mis d'accord sur les niveaux de risque admissible ? est-ce qu'il suffit que je prenne un gros coefficient de sécurité pour être en sécurité ? pourquoi est-ce que l'on ne fait pas de calcul aux ELS en situation accidentelle ? etc.

Arrivés à ce niveau, les étudiants ont dans l'ensemble une bonne connaissance des techniques de dimensionnement des ouvrages – calcul de structures et géotechnique – et du milieu marin. Leur faiblesse tient dans l'insuffisance de leurs connaissances sur les techniques de modélisation de l'incertain : probabilités et statistiques, dont les notions de base ne sont pas toujours acquises. Cela prend plus de temps pour expliquer la notion de fractile d'une loi de distribution, d'incertitude d'échantillonnage, de période de retour.

En effet mon objectif est qu'à l'issue de ces enseignements les étudiants aient bien compris les fondements du « format de vérification » des ouvrages de génie civil, qui constitue la base des règles de calcul formalisées dans les Eurocodes. Ce format prend en considération des enjeux de sécurité et d'économie. Il est basé, comme on l'a vu, sur l'identification des états-limites et l'utilisation de coefficients partiels mis en œuvre dans des combinaisons types d'actions, et dont la sévérité dépend de l'importance des états-limites : les étudiants découvrent l'application de ce format aux ouvrages en site aquatique en ouvrant les recommandations ROSA 2000. Les présentations prennent en compte la révision en cours de ROSA 2000 et de la norme européenne en cours de rédaction prEN 1991-1-8 « *Actions from waves and currents on coastal structures* ». L'accent est mis sur les actions qui s'exercent dans les sites portuaires, côtiers et fluviaux (actions hydrauliques, charges d'exploitation) et sur les états-limites structurels et géotechniques les plus fréquemment rencontrés pour les structures portuaires. L'historique du développement des Eurocodes est présenté au regard de l'objectif de réduction des barrières aux échanges au sein de l'Union européenne.

Les étudiants se familiarisent avec le vocabulaire particulier qui parcourt les Eurocodes (cf. section 2.5.2). Ils décryptent le sens des coefficients partiels. Je leur propose un regard original sur ces coefficients de sécurité, dont ils ont pour la plupart déjà entendu parler et qu'ils ont déjà pu manier dans des exercices ou des projets. Il s'agit avant tout de se détacher d'une application « scolaire » des normes et règlements (le but de cet enseignement n'est pas de leur procurer des connaissances supplémentaires dans l'exécution de calculs à proprement parler, que ce soit pour la résistance des matériaux, le calcul géotechnique ou l'hydraulique maritime et fluviale).

Après une présentation générale des Eurocodes et du « format » semi-probabiliste aux états-limites, et une sensibilisation aux incertitudes qui affectent les constructions (conception, reconnaissance, calcul, exploitation), l'enseignement ouvre sur des approfondissements sur la théorie de la fiabilité et l'analyse des risques. J'expose ensuite les outils d'application aux actions hydrauliques, portuaires, et à la géotechnique. Les étudiants sont invités à débattre des questions de sécurité avec leurs autres enseignants et ils découvrent la diversité des points de vue sur des approches de la sécurité au sein de la communauté du génie civil.

Je suis heureux que depuis plus de 20 ans les responsables de ces enseignements continuent de me faire confiance. Je n'ai pas recherché à développer outre mesure le temps d'enseignement pour que cela reste compatible avec mes activités professionnelles. J'ai répondu favorablement à la sollicitation de l'ESITC Caen (le nom de l'école a changé en 2022 pour devenir « Builders-Ecole d'ingénieurs ») pour

intervenir dans une session commune à la 5^e année de la filière maritime et au mastère spécialisé *Smart Port and Marine Environment Management*, puis, à la création de l'université Gustave Eiffel, dans un parcours de M2 généraliste (non spécifiquement maritime) sur l'ingénierie de projet et le génie civil.

Je suis également intervenu quelques années, alors que je travaillais au STCPMVN et au port autonome de Rouen, dans les sessions de formation continue sur la géotechnique des travaux maritimes organisées par Ponts-Formation-Conseil.

1.5.2 Pilotage et gouvernance scientifique

Peu à peu mes fonctions m'ont amené à prendre des responsabilités dans le pilotage d'instances ou événements variés.

Dans la « filière » de la normalisation, ma candidature au Comité d'orientation stratégique « Transport et logistique » d'Afnor a été acceptée et j'y ai fait deux mandats de trois ans (2008-2014) pendant que j'exerçais mes fonctions à la DGITM. Plus tard, l'université Gustave Eiffel nouvellement créée a déposé sa candidature au conseil d'administration d'Afnor en me désignant comme son représentant, et cette candidature a été approuvée par un vote de l'assemblée générale de juin 2021.

Dans la « filière » des ouvrages en site aquatique, la section française de l'AIPCN m'a proposé de faire partie de la commission maritime MarCom. Quelques années plus tard le président (français) de MarCom m'a invité à prendre le secrétariat de cette commission, le précédent secrétaire néerlandais étant appelé à d'autres fonctions. Ce fut une période très enrichissante (2008-2012) puisque le secrétaire d'une commission technique de l'AIPCN, outre le suivi de l'état d'avancement des groupes de travail, intervient dans la rédaction des termes de référence de ces groupes et, surtout, endosse le rôle de relecteur général des productions des groupes, gros rapports de cent à plusieurs centaines de pages, en anglais, en se basant bien sûr sur les avis émis par les membres de MarCom, et donne le « bon à tirer ». A la suite d'un changement de présidence en 2011, j'ai « passé la main » de MarCom à un secrétaire espagnol en 2012. Je suis revenu quelques années plus tard dans l'organisation du congrès international PIANC Smart Rivers tenu en 2019 à Lyon dont j'ai présidé le comité scientifique. Puis j'ai été nommé président du comité scientifique du nouveau colloque « Rencontres de l'Ingénierie Maritime » (RIM) créé en 2022 par l'AIPCN, la SHF, Syntec Ingénierie, le Cerema et Builders Ecole d'ingénieurs.

Dans la « filière » formation, après quelques années au conseil de perfectionnement de l'ESITC Caen (maintenant Builders Ecole d'ingénieurs) où j'étais rentré en 2018, son directeur général m'a proposé en 2021 d'en prendre la présidence.

Dans la « filière » générale, j'ai d'abord été nommé membre du conseil d'administration du LCPC en tant que représentant de la tutelle par le ministère du développement durable (2007-2010) alors que j'occupais les fonctions de sous-directeur des études et de la prospective. Le congrès européen bisannuel TRA ayant lieu en France (Paris) en 2014 sous l'égide de la CEDR et de la commission européenne, le ministère m'a proposé de présider le comité de pilotage. Ayant rejoint l'Ifsttar l'année suivante en 2015, mon portefeuille des participations à la gouvernance d'organisation scientifiques et techniques s'est considérablement développé puisque je suis rentré aux conseils d'administration (ou ce qui en tient lieu, sous diverses appellations) des IRT/ITE Vedecom, Efficacity, Railenium (dans ce dernier avec la qualification de « vice-président recherche »), puis de l'Idrrim (2016), de l'IREX (2021),

de LCPC-Experts (2015 jusqu'en 2019, année à laquelle où cette filiale de l'Ifsttar a été dissoute). Je suis rentré au *board of directors* de l'*ITS World Congress* (2016-2020, en tant que membre), au conseil de surveillance et d'appel de Certifer (2015-2019, en qualité de président) et après quelques années de participation au conseil scientifique du Centre d'étude des tunnels où j'étais rentré fin 2016, son directeur général m'a proposé en 2022 d'en prendre la présidence.

Mes activités spécifiques de direction du « campus de Versailles » de l'université Gustave Eiffel (et précédemment du « site de Versailles » de l'Ifsttar), m'ont conduit à être *Demonstration Co-Chair* au 30^e colloque IEEE *Electric Vehicle Symposium* qui s'est tenu en 2019 sur la piste d'essais de Satory. Enfin, par l'expérience de management dans les milieux scientifiques et techniques, j'ai répondu favorablement à la sollicitation d'INRAE en 2021 à prendre la présidence de la commission d'évaluation des ingénieurs (CEI) de cet EPST, pour un mandat de cinq ans.

1.6. Bilan et perspectives vers de futurs travaux

Ce mémoire de VAE m'amène à regarder le passé avec trois décennies de recul. J'en tire une expression de synthèse des forces et faiblesses de mon parcours. A partir de mon observation du déplacement des centres d'intérêt de la communauté scientifique, je propose une analyse des menaces et opportunités à venir pour la prise en compte de l'incertain dans le dimensionnement des ouvrages de génie civil.

1.6.1 Forces

Je pense que la force de mon parcours est d'avoir toujours pu maintenir un lien avec les activités scientifiques. Même si son intensité a connu des hauts et des bas, le lien n'a jamais été rompu. La force c'est aussi d'avoir pu très vite me confronter avec les apprenants dans le face-à-face pédagogique, et moi-même apprendre des questions et remarques des étudiants (comme sur la prise en compte du changement climatique, de la montée du niveau de la mer ; ou comme aussi sur la distinction nécessaire entre dimensionnement et justification).

Le fait d'être « passé de l'autre côté de la barrière » en appliquant ROSA 2000 au projet de construction d'un quai (Honfleur) (cf. section 2.5.3) m'a permis de porter un autre regard sur le format de vérification et m'a définitivement convaincu de la pertinence du format *sans* coefficients de modèle généralisés, moins joli, plus maniable, au final *plus sobre et plus sûr*. La capacité à rebondir pour adapter mes enseignements aux choix effectués pour les normes d'application géotechnique, et (en cours) pour refondre ROSA 2000 dans un manuel plus concis et centré sur la question du format de sécurité est également une force de mon parcours.

Enfin je relèverais la chance d'avoir été au contact de communautés scientifiques variées (géotechnique, hydraulique, calcul de structures) et d'avoir appris à me décentrer d'une application exclusivement « structures » du format des Eurocodes, en allant voir à la source des « analyses de risques » et en trouvant les moyens de réexpliquer différemment le sens d'une combinaison d'actions ou d'un état-limite ultime.

1.6.2 Faiblesses

Une fois quitté le STCPMVN mes relations avec la communauté de recherche ont été plus distantes. Il en vient une faiblesse dans l'entretien de mes connaissances qui ont eu du mal à se tenir en permanence à la pointe des discussions et à rester à jour des problématiques, qui sont toujours en

évolution. Ainsi je n'ai pas été présent dans le passage à la 2^e génération des Eurocodes. Dans le domaine géotechnique la 2^e génération a en quelque sorte renversé les points de vue. La 1^{ère} génération partait des essais de sol (*in situ*, de laboratoire), donnait les propriétés que ces essais permettaient de déterminer et concluait sur les méthodes à utiliser pour la justification des ouvrages géotechniques. La 2^e génération (mieux en accord avec la démarche des Eurocodes) part quant à elle des critères de stabilité à respecter du point de vue de l'ouvrage (non glissement, tassement limité...) et décrit une ou plusieurs méthodes de justification mettant en œuvre telles ou telles propriétés des couches de sol concernées. D'une certaine manière le dimensionnement hydraulique est en train de passer par les mêmes étapes que la géotechnique, vingt ans après.

Par ailleurs je n'ai pas beaucoup publié dans des revues internationales. Ma priorité était en effet de toucher les acteurs de la Recherche & Développement de sorte que mes résultats puissent être mis en œuvre si l'on jugeait qu'ils doivent l'être, plutôt que d'alimenter les discussions à caractère plus académique sur le renouvellement des questions de recherche à la frontière des connaissances.

Une autre faiblesse est que je suis resté sur une « niche ». Un investissement plus précoce sur d'autres horizons et un ressourcement scientifique m'auraient certainement incité à ouvrir plus tôt des travaux sur les sujets du changement climatique que je développe plus bas (comme « opportunités »).

1.6.3 Menaces

Car depuis une trentaine d'années les centres d'intérêt scientifiques se sont substantiellement déplacés. Je tente ici une rétrospective.

Dans les années 1990, l'objectif est littéralement de faire naître les Eurocodes pour réaliser le grand marché européen de l'ingénierie et de la construction. Il fallait pour cela surmonter les résistances nationales (« protectionnisme réglementaire ») et les objections philosophiques sur l'acceptabilité des probabilités de défaillance ou la possibilité de déterminer des valeurs caractéristiques « objectives » des propriétés des sols. Pour construire un consensus *a minima*, éviter les objections majeures lors des enquêtes, il était nécessaire que « chacun pût vivre » avec les textes proposés. Les adaptations nationales étaient nombreuses et l'on autorisait plusieurs cas de pondération (approches 1, 2, 3) pour que chacun s'y retrouve. Beaucoup de travaux étaient publiés sur les calages probabilistes des coefficients partiels de sécurité.

L'Eurocode 7 contenait des principes généraux mais volontairement peu de méthodes opérationnelles pour le calcul des actions et résistances géotechniques, qui étaient laissées à la discrétion des normes nationales. Celles-ci ont été rédigées dans les années 2000. En France le choix a été fait d'une approche de calcul simple et efficace avec des coefficients partiels sur les actions regroupant les incertitudes de valeur et les incertitudes de modèle et privilégiant la pondération des résistances (approche 2) (à l'exception de la stabilité des talus et pentes, relevant de l'approche 3). Ce choix a remis en cause le pari que j'avais fait dans ROSA 2000 de prendre en compte les incertitudes « à la source » et de pondérer par conséquent directement les propriétés de base des matériaux. Mon travail se révélait donc obsolète sur ce point (mais d'autres parties sur les actions maritimes et portuaires demeuraient néanmoins applicables).

Dans les années 2010, le champ couvert par les Eurocodes a été étendu (mandat M515 de la Commission européenne, *Mandate for amending existing Eurocodes and extending the scope of structural Eurocodes*, 2012). C'est à ce moment que les travaux normatifs sur les actions maritimes ont

été ouverts. Dans cette nouvelle génération d'Eurocodes, les adaptations nationales ont été contraintes de se restreindre. C'est aussi à ce moment qu'a débuté la révision de l'EN 1990, mais l'heure des débats sur les avantages et inconvénients des différents formats de sécurité était passée. Les méthodes probabilistes gagnaient du terrain, non plus comme simples outils de calcul de coefficients partiels semi-probabilistes, mais comme des méthodes directes de justification, à portée des bureaux d'études. Revers de la médaille, l'incorporation de nouvelles règles pour prendre en compte les avancées de la recherche sur les matériaux et structures n'a cessé de complexifier le design et de renchérir le coût de la construction (tendance à l'augmentation des ferraillements du béton armé par exemple), avec des tentations de rejet des Eurocodes dans les bureaux d'études travaillant à l'international.

Aujourd'hui, dans les années 2020, j'identifie deux menaces pour la prospérité de mes travaux :

- les Eurocodes ne se sont pas encore imposés comme référence mondiale. Aux dires de sociétés d'ingénierie, la philosophie des normes anglo-saxonnes (britanniques, américaines) serait mieux adaptée quand il s'agit d'ouvrages un peu complexes ou inédits : ces normes sont réputées plus pragmatiques, plus souples et méthodologiques, moins « directives » ;
- La persistance des concepts et vocabulaires pré-Eurocodes continue de faire obstacle à la compréhension entre domaines techniques et à l'harmonisation des pratiques. Il n'est pas toujours sûr que l'on mette les mêmes sens sous les mêmes termes : posons des questions autour de nous : qu'est-ce qu'un état-limite ? qu'une combinaison d'actions ? qu'un coefficient de sécurité ?

1.6.4 *Opportunités*

Pour autant des opportunités émergent pour lancer de nouveaux thèmes de recherche en prise sur les grands défis actuels en prise avec le paradigme du « développement durable » ou « soutenable » :

- d'abord le défi de la décarbonation pour atténuer le changement climatique : décarboner la production des matériaux de construction, décarboner les procédés de mise en œuvre ;
- et aussi le défi de l'adaptation, qui concerne tout autant le changement climatique que les changements d'usage : les réflexions doivent se poursuivre pour renouveler les méthodes de conception, pour dire comment faire pour construire des ouvrages modulables/adaptables à des conditions d'environnement qui vont en empirant, alors que les usages seront possiblement différents des usages actuels dans 10 ou 20 ans ;
- pour cela il convient d'adapter nos outils mathématiques et pratiques de prise en compte de l'incertain pour prendre en compte le dérèglement climatique (Oumeraci, 2000a) : que deviennent les notions de valeur caractéristique, de coefficient partiel, les indices de fiabilité, les probabilités de ruine, les situations de projet accidentelles ou extrêmes ? C'est là toute la question de la non stationnarité des lois de probabilité décrivant les phénomènes climatiques ou climato-induits (glissement des espérances, augmentation des variances). L'enjeu est d'arriver à faire des projections sur l'avenir à partir de données peu nombreuses. Avec l'arrivée de nouvelles données climatiques année après année, faudra-t-il recalculer les règles de dimensionnement quasiment « en temps réel » ?

Plus particulièrement, j'identifie un ensemble de questions de recherche à aborder :

- Changement climatique : non stationnarité des processus stochastiques des actions de type vent, houle, surcotes/décotes... dans le dimensionnement semi-probabiliste : prendre en compte cette

dimension supplémentaire de l'incertain. Quel re-calage des coefficients partiels et des valeurs caractéristiques, quelle re-définition des périodes de retour cibles ? quels indices de fiabilité cible pour des ouvrages supposés adaptables pendant toute leur durée de vie ?

- Passer de la construction neuve à la maintenance, la réparation et l'analyse de capacité de quais/digues/écluses existantes : comment prendre en compte de nouvelles sources d'incertitudes sur la connaissance des chargements *passés* ? sur la connaissance des capacités résiduelles de résistance ? que dire des ouvrages anciens qui ne « passent » pas les règles de calcul actuelles mais qui présentent apparemment un bon état structurel ? quel re-calage des coefficients partiels et des valeurs caractéristiques, des indices de fiabilité cible, dans le prolongement de la spécification technique européenne XP CEN/TS 17440 (2000) sur l'évaluation et la rénovation des structures existantes qui indique à ce stade que, pour les ouvrages d'art, « en l'absence d'une valeur spécifiée par l'autorité compétente, il convient que la valeur de l'indice de fiabilité cible pour les structures existantes soit la même que pour les conceptions d'ouvrages neufs » ?
- Vieillesse : les conditions classiques d'état-limite en « tout ou rien » sont-elles vraiment adaptées au comportement des ouvrages dans le temps ? comment prendre en compte le vieillissement d'usage (la réduction de la résistance dépend des charges appliquées, cf. fatigue) et le vieillissement lié au temps (c'est-à-dire indépendamment de l'historique de chargement) ? Et si en alternative aux états-limites on introduisait un dimensionnement par les *courbes de résilience* ?

Ces opportunités de recherche sont poussées par les préoccupations citoyennes qui s'expriment dans notre société, relayées entre autres par mes étudiants de M2 avec qui nous échangeons librement. Elles m'invitent à poursuivre maintenant avec les laboratoires GERS/SRO et MAST/EMGCU de l'université Gustave Eiffel, à poursuivre sur l'analyse des ouvrages existants (cosignature de l'article **[18]**), en collaboration avec la direction technique Risques, Eau et Mer du Cerema et les organismes du réseau scientifique du ministère en charge du développement durable.

Partie 2. Aptitudes et capacités développées dans les activités de recherche, de valorisation et d'encadrement

J'examine maintenant mes acquis de l'expérience au regard de l'arrêté du 22 février 2019 *définissant les compétences des diplômés du doctorat et inscrivant le doctorat au répertoire national de la certification professionnelle* (annexe H).

2.1. Faire le point sur l'état des connaissances

2.1.1 Différentes approches de la sécurité

Mes travaux ont porté principalement sur les applications de l'approche conceptuelle de la sécurité des Eurocodes, la méthode semi-probabiliste aux états-limites issue des travaux menés depuis les années 1950 sur la fiabilité des structures béton et métal, à des domaines connexes comme la géotechnique, les actions de l'eau (houles et courants) et les actions portuaires (accostage, amarrage, stockage des marchandises sur terre-pleins et descentes de charge des outillages de manutention).

J'ai consulté pour cela les documents généraux sur la prise en compte de l'incertain, dont je distingue quatre groupes :

- Les références didactiques sur les méthodes semi-probabilistes et probabilistes, où j'ai trouvé le corpus théorique nécessaire à une approche rigoureuse de la problématique de la fiabilité, mais toujours dans une perspective d'application aux problèmes de l'ingénierie (c'est-à-dire sans focalisation sur les aspects purement mathématiques) : indices de fiabilité, périodes de retour, combinaisons d'actions, coefficients partiels (Ang & Tang, 1975), (de Buhan et al., 1993), (Calgaro, 1996), (Ditlevsen & Madsen, 1996), (Calgaro, 2016) ;
- Les textes appliquant l'approche semi-probabiliste aux états-limites : le projet d'EN 1990 « Bases du calcul », le texte de référence par excellence, et une documentation française structurante, que l'on pourrait qualifier d'anticipation des Eurocodes et basées sur les Directives communes (Ministère de l'équipement, 1979) sur le calcul des constructions (en quelque sorte l'ancêtre de l'EN 1990), le calcul des ouvrages en béton armé aux états-limites (BAEL, 1991), le calcul des fondations superficielles et profondes aux états-limites (fascicule 62 titre V, 1993) ; ces textes m'ont permis de comprendre l'usage pragmatique qui était fait des notions théoriques plus haut, et de voir comment les incertitudes étaient prises en compte dans la pratique par un véritable processus structuré en étapes successives (les Directives communes de 1979 étant particulièrement claires sur ce point). A ce groupe j'associe le rapport de (Mathieu, 1975) qui a joué un rôle déterminant dans l'approche française des coefficients de modèle (détermination du coefficient γ_{F3} de 1,125 pour les structures béton et 1,075 pour les structures métalliques) ; il y avait aussi les recommandations espagnoles (ROM, 1990) qui avaient engagé avant la France une réflexion sur l'adaptation des Eurocodes aux ouvrages portuaires avec un recours assez développé aux approches statistiques théoriques ;
- Les textes mettant en œuvre une approche classique ou traditionnelle, c'est-à-dire prenant en compte l'incertain : (i) par des coefficients globaux de sécurité (par exemple s'agissant de critères géotechniques 1,50 sur le glissement des caissons, 2,00 au poinçonnement des quais sur pieux), comme indiqué sous l'appellation « approche déterministe dans les normes britanniques (BS 6349, 2000), ou (ii) par une limitation des contraintes dans les matériaux à des niveaux de « contraintes admissibles » (par exemple, limitation de la contrainte dans les aciers de

construction à $2/3 \times \sigma_e$ dans les portes d'écluse ou vannes de barrages, où σ_e désigne la limite élastique de l'acier maintenant représentée par f_y), en France, les règles (DTU P225-701, 1966, dites « règles CM 66), aux USA et en construction *offshore*, la méthode *Working Stress Design* (WSD) (API, 2000); ou encore (iii) du côté des actions, par des « valeurs normales » et des « valeurs extrêmes » : en France (DTU P 06-002, 1965, dites « règles Neige et Vent »);

- Les textes promouvant une approche intermédiaire de l'incertain, la méthode dite LRFD (*Load and Resistance Factor Design*), que l'on voit en Allemagne dans (EAU, 1996), somme toute assez proche du format des Eurocodes, représentée aux Etats-Unis par le texte de l'AASHTO sur la justification des ponts (1991) et le code ACI 318-95 (1995).

Pour comparer ces différents formats de manière schématique, en utilisant des notations communes (les textes originaux peuvent utiliser des symboles différents).

Coefficient de sécurité global

$$S \leq R/FoS \quad (4)$$

Contraintes admissibles

$$\sigma \leq \sigma_{matériau}/FoS \quad (5)$$

Load and Resistance Factor Design

$$\gamma_S \times S(\sum F) \leq \frac{R}{\gamma_R} \quad (6)$$

Eurocodes

$$S(\sum \gamma_F \times F_k) \leq \frac{R(X_k)}{\gamma_R} \quad (7)$$

ou encore, avec la pondération à la source des propriétés des matériaux :

$$S(\sum \gamma_F \times F_k) \leq R \left(\frac{X_k}{\gamma_M} \right) \quad (8)$$

ou encore, en faisant apparaître les coefficients de modèle :

$$\gamma_{Sd} \times S(\sum \gamma_f \times F_k) \leq R \left(\frac{X_k}{\gamma_m} \right) / \gamma_{Rd} \quad (9)$$

avec :

- S : valeur nominale d'une sollicitation
- R : valeur nominale d'une résistance
- σ : valeur nominale de la contrainte dans la structure sous l'effet des actions extérieures
- $\sigma_{matériau}$: valeur nominale de la contrainte limite du matériau
- F : valeur nominale d'une action
- F_k : valeur caractéristique d'une action
- X_k : valeur caractéristique d'une propriété de matériau
- Fos : coefficient de sécurité global
- γ_S : coefficient de sécurité partiel sur une sollicitation (*load*)

- γ_R : coefficient de sécurité partiel sur une résistance
- γ_F : coefficient de sécurité partiel sur une action
- γ_M : coefficient de sécurité partiel sur une propriété de matériau
- γ_f : coefficient de sécurité partiel de valeur sur une action
- γ_m : coefficient de sécurité partiel de valeur sur une propriété de matériau
- γ_{Sd} : coefficient de sécurité partiel de modèle sur un modèle d'action ou de sollicitations
- γ_{Rd} : coefficient de sécurité partiel de modèle sur un modèle de résistance

Deux sortes de documents relatifs spécifiquement au dimensionnement des ouvrages portuaires ont été utilisés :

- Les documents exposant les méthodes en France : ces documents étaient émis par le STCPMVN avec une série de notices reprenant les différents types d'ouvrage (quais poids, quais-blocs, gabions, soutènements palplanches ou parois moulées avec leurs tirants d'ancrage, ducs d'Albe, quais sur pieux) ;
- Les premiers essais d'introduction des « nouveaux » formats de sécurité dans ces ouvrages : j'ai utilisé notamment les rapports de l'AIPCN sur les digues (présentant une démarche probabiliste et introduisant un coefficient de sécurité partiel très élaboré sur la hauteur de la houle, fonction de la probabilité cible de ruine, sur lequel je reviendrai plus loin), les ROM espagnoles (1990) (déroulant une démarche très étudiée de prise en compte de l'incertain, distinguant notamment les niveaux de sécurité cible selon l'importance socio-économique des ouvrages, insérant le dimensionnement des structures dans le travail de conception générale du port avec ses multiples fonctionnalités au-delà des état-limites structuraux), les normes britanniques BS 6349 (2000, puis 2016) (mettant en œuvre un schéma non directif de prise en compte de l'incertain : la norme décrit les incertitudes avec beaucoup de pédagogie, le designer apprécie les niveaux de sécurité auxquels se placer en fonction du contexte, l'accent est mis sur la durabilité de l'ouvrage avec les notions de durée de service et de période de retour), et les documents allemands (EAU, 1990) puis (EAU, 1996) (avec de nombreux tableaux donnant les valeurs des coefficients partiels, et des notions complémentaires aux Eurocodes introduites afin de pouvoir se raccorder à la pratique nationale antérieure, à savoir trois « cas de charge » – LC1 : actions permanentes et actions variables usuelles ; LC2 : id LC1 avec des actions variables rares ; LC 3 : id LC 2 avec des actions exceptionnelles – qui viennent en parallèle des combinaisons types d'actions des Eurocodes).

2.1.2 Méthodes de calage des coefficients de sécurité

Les méthodes de calage des coefficients de sécurité partiels étaient décrites dans la littérature, notamment (Mathieu, 1975), (Ditlevsen & Madsen, 1996) et (Calgaro, 1996), et leurs applications dans les annexes à l'EN 1990 :

- Calage probabiliste par ouvrage, conforme aux orientations des Eurocodes, à effectuer par référence à des indices de fiabilité-cible donnés dans l'annexe C de l'EN 1990 (issu des travaux du Comité Européen du Béton dans les années 1960-70). Dans la méthode simplifiée des « valeurs de calcul » proposée dans l'annexe C de l'EN 1990, les facteurs d'influence de la sollicitation et de la résistance α_S et α_R sont supposés connus (valeurs données forfaitairement dans l'annexe C) ; sollicitation et résistance sont modélisées par des variables aléatoires ; leurs valeurs de calcul sont déterminées en fonction de l'indice de fiabilité cible à partir des fonctions de répartition et les coefficients partiels s'en déduisent connaissant les valeurs caractéristiques. Cette méthode vient

directement de la théorie de la fiabilité (dont elle constitue une application très pédagogique) et je l'ai utilisée dans mes travaux sur les résistances des pieux et sur les actions de la houle. Ses fondements théoriques sont très bien exposés dans (Ditlevsen & Madsen, 1996) et (Calgaro, 1996) ;

- Calage probabiliste sur une population d'ouvrages (c'est-à-dire sur un ensemble d'ouvrages de même type mais qui diffèrent par l'intensité des actions appliquées, par les propriétés des sols et par la géométrie du site de projet), telle que mise en œuvre pour les plates-formes offshore de type jacket (Goyet et al., 1990) et (Goyet et al., 1998). Cette méthode m'a fortement inspiré dans mes travaux sur le calage des coefficients de modèle pour les ouvrages portuaires et les barrages ;
- Calage probabiliste des coefficients partiels de résistance, décrit dans l'annexe D de l'EN 1990, voir aussi (Mathieu, 1975) et (Besse et al., 1993). Cette méthode permet d'exploiter des résultats d'essais en les comparant aux valeurs théoriques prédites par un modèle tout en prenant en compte la dispersion de ses paramètres d'entrée. Elle a été notamment utilisée dans le travail sur le calage de coefficients de modèle de la résistance des pieux sous chargement axial.

Pour schématiser ces différentes méthodes :

Calage probabiliste par ouvrage

$$S_d = F_S^{-1}(\Phi(-\alpha_S \cdot \beta_0)) \quad (10)$$

$$R_d = F_R^{-1}(\Phi(-\alpha_R \cdot \beta_0)) \quad (11)$$

$$\gamma_S = \frac{S_d}{S_k} \quad (12)$$

$$\gamma_R = \frac{R_k}{R_d} \quad (13)$$

avec :

- S_d : valeur de calcul de la sollicitation
- R_d : valeur de calcul de la résistance
- S_k : valeur caractéristique de la sollicitation (déterminée par ailleurs, par exemple en référence à une période de retour et en prenant en compte la loi de probabilité de S)
- R_k : valeur caractéristique de la résistance (déterminée par ailleurs, par exemple en référence à un fractile de la loi de probabilité de R)
- γ_S : coefficient de sécurité partiel sur la sollicitation
- γ_R : coefficient de sécurité partiel sur la résistance
- F_S : fonction de répartition de la loi de probabilité de S
- F_R : fonction de répartition de la loi de probabilité de R
- α_S : facteur d'influence de la sollicitation S
- α_R : facteur d'influence de la résistance R
- β_0 : indice de fiabilité-cible
- Φ : fonction de répartition de la loi normale centrée réduite

Calage probabiliste sur une population d'ouvrages

Le jeu des coefficients partiels optimum (γ) est déterminé de façon à minimiser la fonctionnelle f :

$$f(\underline{\gamma}) = \sum_i w_i |\beta_0 - \beta_i(\underline{\gamma})|^2 \quad (14)$$

avec

- i : indice de l'ouvrage considéré
- w_i : pondération de représentativité de l'ouvrage (i) au sein de la population (avec $\sum_i w_i = 1$)
- β_0 : indice de fiabilité-cible
- $\beta_i(\underline{\gamma})$: l'indice de fiabilité de l'ouvrage (i) dimensionné avec les coefficients ($\underline{\gamma}$).

Calage probabiliste d'un coefficient partiel de résistance

L'erreur de modèle est prise en compte par un paramètre $b \times \delta$ multipliant la résistance théorique R_t . Les incertitudes correspondant à la variabilité des paramètres d'entrée de R_t rendent R_t aléatoire. Les lois de δ et de R_t sont supposées lognormales, ce qui permet de considérer que la résistance calculée R suit également une loi lognormale. Le facteur b correspond au biais du modèle, de sorte que l'espérance de δ vaille 1,00.

Les comparaisons entre résultats d'essais $R_{e,i}$ et résultats théoriques $R_{t,i}$ sont considérées comme autant de réalisations δ_i permettant d'estimer la loi de distribution de la variable aléatoire δ .

$$b \times \delta_i = \frac{R_{e,i}}{R_{t,i}} \quad (15)$$

$$R = b \times R_t \times \delta \quad (16)$$

$$\gamma_R = \frac{R_k}{R_d} \quad (17)$$

où R_k et R_d sont les valeurs caractéristiques et de calcul de la résistance R , déterminées comme des fractiles appropriés de la loi de distribution de R .

2.1.3 Sécurité des barrages de retenue

En ce qui concerne les barrages de retenue, les éléments de bibliographie étaient apportés :

- par les documents techniques du CFBR (versions actualisées 2012, 2015, 2018) et l'ouvrage (Hartford et al., 2004) ;
- par les textes réglementaires ministériels sur la prise en compte de la sécurité : décret n° 2007-1735 du 11 décembre 2007 *relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques et modifiant le code de l'environnement*, et son arrêté du 29 février 2008 *fixant des prescriptions relatives à la sécurité et à la sûreté des ouvrages hydrauliques* (qui sera abrogé par l'arrêté du 6 août 2018 *fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages*).

Il est original qu'une revue bibliographique porte tant d'intérêt à des textes de nature réglementaire. Mais il s'agit de sécurité des populations. Si la puissance publique intervient pour fixer les règles du jeu, les scientifiques ont la responsabilité majeure d'éclairer la décision publique par leurs réflexions

et leurs travaux (appui aux politiques publiques, ou action publique, qui fait partie intégralement de la « 3^e mission » des universités avec l'enseignement et la recherche).

Pour schématiser l'apport de ces références, en comparaison des concepts et outils développés pour le génie civil « classique » ou les Eurocodes et décrits plus hauts, j'ai relevé que :

- la sécurité des barrages s'inscrit dans la philosophie des études de danger issues de la sécurité industrielle avec des scénarios d'événements non souhaités (risques), là où la sécurité du génie civil prend appui sur des critères de justification mécanique ou hydraulique (états-limites). Les risques à prendre en compte pour les barrages, listés dans la réglementation, sont par exemple le séisme, le glissement de terrain, les chutes de blocs, les avalanches, les ruptures d'ouvrage, les incidents d'exploitation... Les états-limites du génie civil pourraient être considérés quant à eux comme autant de déclinaisons du risque « rupture d'ouvrage ».
- Les études de danger indiquent les niveaux de risque initial, les mesures de réduction à prendre par l'exploitant, les niveaux de risque résiduel. Le dossier doit être approuvé par le ministre après avis d'un comité technique. Ce n'est que récemment que les niveaux de risque résiduel acceptables pratiqués dans les faits ont été officialisés (arrêté de 2018). Ils s'expriment par des probabilités maximales annuelles de survenance de la défaillance. En ce sens, du point de vue du projeteur, l'approche « barrages » est résolument probabiliste (la probabilité de la défaillance doit rester inférieure à la probabilité admissible), là où les conditions d'état-limite du génie civil, une fois calés les coefficients de sécurité et les valeurs caractéristiques, sont de nature déterministe (la valeur de calcul de la sollicitation doit rester inférieure à la valeur de calcul de la résistance).
- Toutefois l'approche « barrages » du risque de défaillance de la structure de génie civil et de ses fondations ne se place pas dans le calcul des probabilités mais elle met en œuvre les coefficients globaux de sécurité ou des contraintes admissibles dans un format analogue à ce qui a été présenté plus haut (Londe, 1998).

La prise de connaissance de la bibliographie sur les barrages a été particulièrement utile pour prendre du recul sur le format des Eurocodes et resituer celui-ci au sein des méthodes d'analyse et de maîtrise des risques.

2.1.4 Débats et controverses sur les approches de la sécurité

Une norme européenne sur le dimensionnement des constructions doit prendre en considération un ensemble de codes et de règles nationales pour retenir (c'est le but) les meilleurs éléments. Sa rédaction suscite naturellement des résistances au changement, qui peuvent tourner aux controverses.

J'ai participé directement à de tels débats, d'abord dans les années 1990 au sein de la commission miroir française sur l'Eurocode 7, et récemment au sein de la commission de normalisation du CEN sur les actions de la houle et du courant.

L'application des méthodes de coefficients partiels au dimensionnement géotechnique n'allait pas de soi. Quand les matériaux de construction sont homogènes et relativement bien connus, il est considéré comme acceptable de décrire les variations de leurs propriétés par des lois de probabilité. Mais s'agissant de sols pour lesquels il y a tout à la fois des incertitudes sur les épaisseurs des couches voire des présomptions de discontinuités et peu de mesures ce qui ne permet pas de tester l'homogénéité avec des méthodes statistiques, la modélisation des incertitudes par des lois de probabilité n'est-elle pas une utopie ? même une utopie dangereuse, car elle peut donner une fausse impression de sécurité

(effet d'écran : je me crois en sécurité parce que j'ai pris le coefficient de sécurité prescrit par la norme... mais le risque est peut-être ailleurs, dans une insuffisance de la reconnaissance géotechnique préalable). L'introduction des coefficients partiels sous la « pression des Eurocodes » était mal vécue par une partie de la profession, qui tendait à privilégier l'expertise du géotechnicien et sa proposition des « valeurs de sol » à prendre dans les calculs du bureau d'études. Notre travail avec F. Baguelin sur les valeurs caractéristiques avait pour but de montrer qu'il était possible de faire un usage raisonnable des méthodes d'analyse statistiques sur un ensemble de propriétés du sol pour peu que les conditions de base soient réunies (couche géologiquement homogène et taille suffisante de l'échantillon de valeurs), afin d'éclairer l'expertise du géotechnicien, non de s'y substituer.

Un autre problème venait sérieusement interpellé la faisabilité des coefficients partiels au calcul géotechnique. Comment appliquer des coefficients partiels à des propriétés des sols (paramètres de résistance au cisaillement, issus des essais de laboratoire) qui interviennent à la fois du côté des actions et des résistances des ouvrages de soutènement, c'est-à-dire sur la poussée et sur la butée ? Dans le format de base des Eurocodes, actions et résistances sont pondérées différemment et indépendamment. Mais le « principe de cohérence », qui est un principe avant tout de cohérence physique, dit que quand un paramètre intervient à plusieurs endroits du calcul, on doit le prendre à la même valeur. Ainsi l'angle de frottement interne doit-il être pondéré de la même manière quand il intervient dans le calcul de la poussée et de la butée. Mais si l'incertitude sur la valeur de l'angle de frottement est une chose, comment prendre en compte l'incertitude sur les modèles : modèles de poussée et de butée (modèles à la rupture) et modèles « au module de réaction » (modèles élasto-plastiques) ? N'était-ce pas le moment de faire usage des coefficients de modèle γ_{sd} et γ_{Rd} permis par les Eurocodes ?

D'autres voix s'élevaient pour critiquer la complexité d'un tel format et suggéraient que plutôt que de chercher à tout prix à appliquer un format de sécurité manifestement inadapté, l'on en reste aux coefficients globaux avec une adaptation de façade. C'est-à-dire que le coefficient global de 2,00 pour la mobilisation de la butée (ELU) serait décomposé en 1,35 ou 1,50 du côté de la butée mobilisée (action) et 1,40 du côté de la butée mobilisable (résistance).

La solution figurant dans la version expérimentale de l'EN 1990 n'était pas un compromis mais une juxtaposition de plusieurs cas de pondération, ou approches, à charge pour les documents d'application nationale d'indiquer dans quels cas utiliser l'un plutôt que l'autre :

- approche 2 « structure », avec pondération des résistances, y compris les résistances géotechniques, sans pondération des propriétés des sols : symboliquement, $R_d = \frac{R(X_k)}{\gamma_R}$;
- approche 3 « géotechnique », avec pondération à la source des propriétés des sols, sans pondération des résistances géotechniques, avec mise en œuvre du principe de cohérence (dans un même calcul, un paramètre est considéré avec une valeur identique dans tous les endroits où il apparaît) : symboliquement, $R_d = R\left(\frac{X_k}{\gamma_m}\right)$;
- approche 1, dans laquelle on retient la plus contraignante des approches 2 et 3.

Comme expliqué dans la première partie, j'avais embrassé le parti de l'approche 3 et bâti en ce sens les fascicules de ROSA 2000. La communauté géotechnique française a fait le choix de l'approche 2, dont avec le recul je reconnais la sagesse. Pour les soutènements-plan étudiés avec les modèles élasto-plastiques, les sollicitations (moments fléchissants dans le rideau, tractions dans les tirants d'ancrage,

butée mobilisée) sont pondérées par 1,35 pour tenir compte disons « globalement » des incertitudes sur les actions permanentes et sur le modèle de comportement du massif : les actions permanentes ne sont donc pas pondérées individuellement (pas de coefficients partiels appliqués aux actions permanente). Mais comment prendre en compte les incertitudes sur les actions variables, qui sont plus grandes que les incertitudes sur les actions permanentes ? La solution heuristique de l'approche « 2* » consiste à pondérer à la source les actions variables transmises par le sol (comme les charges de stockage, charges d'exploitation des outillages portuaires) par 1,50 / 1,35, soit 1,11. Bien sûr la non linéarité des modèles élasto-plastiques fait qu'il n'est pas du tout équivalent de pondérer par X en entrée ou en sortie du calcul. Mais la méthode est simple et robuste, au prix d'un renoncement au rêve de niveaux de sécurité probabiliste harmonisés !

En ce qui concerne l'application des coefficients partiels au dimensionnement hydraulique, j'ai déjà dit quelques mots de la controverse sur le format développé par l'AIPCN (PIANC, 1993) pour les actions de la houle. Le coefficient partiel sur la hauteur de la houle qui y était proposé prenait une forme assez complexe :

$$\gamma_H = \frac{H_s(T_{p_f})}{H_s(T)} + \sigma'_{FH_s} \times \left(1 + \left(\frac{H_s(3T)}{H_s(T)} - 1 \right) \times k_\beta \times p_f \right) + \frac{k_s}{\sqrt{p_f \times N}} \quad (18)$$

avec :

- H_s : la hauteur significative de la houle
- P_f : la probabilité admissible de ruine
- T : la durée de vie de l'ouvrage
- T_{p_f} : la période de retour admissible de la ruine, donnée par $T_{p_f} = \left(1 - (1 - p_f)^{\frac{1}{T}} \right)^{-1}$
- k_s et k_β : des paramètres d'ajustement sur la loi de distribution de la houle
- N : le nombre de vagues dans une tempête
- σ'_{FH_s} : l'écart type de la distribution des hauteurs significatives pendant une tempête

En fait cette formule révèle que la prise en compte de l'incertain sur les « paramètres météocéaniques » (néologisme inspiré de l'anglais *metocean parameters*) est d'abord une affaire probabiliste. Cette approche est possible dans la pratique parce que l'on dispose (généralement) de données sur le climat marin aptes à nourrir des modèles probabilistes. Elle montre en creux que le *design* des ouvrages côtiers ne s'accommode pas bien du format des coefficients partiels.

Avec prudence le format de l'AIPCN laissait l'appréciation au cas par cas des niveaux de sécurité cible. Comme on l'a vu, il n'a pas rencontré de succès. Le groupe de travail de normalisation WG6 a connu le débat et s'est décidée en faveur de la fixation de périodes de retour pour les valeurs représentatives de la houle.

On a vu également dans ce qui précède les termes du débat sur l'applicabilité de la méthode des états-limites à accueillir une approche hydraulique basée sur des nombres de stabilité adimensionnels (approche cohérente avec la méthode de dimensionnement par essais sur modèles réduits physiques). Les questions intéressantes posées lors de la conférence d'avril 2023 montrent le chemin qui reste à parcourir pour préciser les rapports entre les « états-limites structuraux » et les « critères de performance hydraulique ». Bien qu'ils relèvent à la base de concepts différents, on est contraint de

les considérer ensemble dans la démarche de dimensionnement d'un ouvrage portuaire ou hydraulique et, par conséquent, d'élargir les notions initiales d'ELS et d'ELU à des critères de vérification mis en œuvre sous les mêmes combinaisons d'actions.

Je continuerai à être présent dans les discussions, dans la mesure de mes moyens, confiant dans les positions qui émergeront du débat au sein de la communauté scientifique. Le travail de mise à jour du Guide enrochements est en cours entre les organismes européens qui en ont la responsabilité (Cerema, Ciria, CUR, 2009). Ce devrait être la bonne occasion de progresser ensemble sur ces questions.

2.2. Conception et mise en œuvre de démarches de recherche

2.2.1 *Caractérisation de la résistance des palplanches de raccord dans les gabionnades*

En poste au STCPMVN j'ai piloté le consortium formé avec les sociétés Bureau Veritas et ProfilArbed et le laboratoire ENPC/CERCISO. Tous avaient décidé de joindre volontairement leurs forces et moyens financiers pour examiner d'un point de vue scientifique le fonctionnement mécanique des gabionnades (Photo 8), et tirer les leçons pour la communauté technique de l'accident de Cherbourg.

Sur ce projet mes responsabilités n'ont pas consisté à trouver directement des connaissances nouvelles, mais à formuler la question scientifique, à décomposer le travail en une série de phases, à animer les réunions de restitution et d'avancement, à co-rédiger le rapport de synthèse. Ce positionnement privilégié m'a donc fait jouer très vite des rôles normalement dévolus à un senior et m'a permis de les apprendre « sur le tas ».

La modélisation mécanique de base « à la main » des états de contrainte dans les trois branches d'une palplanche triple était inopérante : il n'est pas possible d'obtenir un équilibre membranaire au point de raccord en configuration initiale. La géométrie de la palplanche devait obligatoirement se déformer pour assurer l'équilibre statique. La littérature était peu abondante.

Dans ce contexte, la question de recherche était donc de caractériser les contraintes, les déformations et les chargements limites dans les trois branches de la « palplanche triple » pour différents angles de raccord et différents chargements modélisant les dimensions et le remplissage des deux cellules, selon deux modes de ruine: le dégraphage (à l'une ou l'autre extrémité de la palplanche) et la rupture centrale (au droit de la soudure).



Photo 8. Gabionnade en construction sur le port militaire de Brest, Finistère (Photo : Arcelor-Mittal)

Nous avons défini cinq phases de travail.

Revue de la littérature. Le travail effectué lors de la phase judiciaire a été complété par A. Corfdir et a confirmé le faible nombre de références. Les approches théoriques étaient lacunaires. Les rapports sur des accidents rencontrés étaient plus nombreux mais ils concernaient surtout les raccords à 90° (*T-junctions*) qui avaient été largement utilisés aux USA. Le revue bibliographique, notamment (TVA, 1957), (Ovesen, 1962), (Swatek, 1967), (Houy, 1970) et (Rossow, 1984), a ainsi pu être réutilisée pour initialiser la phase de recherche en rassemblant plusieurs expressions heuristiques du supplément de traction dans l'enceinte principale causé par la cellule de raccord.

Modélisation théorique des gabionnades par le calcul à la rupture. Ce fut l'objet de la thèse d'A. Corfdir (ENPC/CERSCO) donnant un encadrement de la charge de rupture. La limite de la méthode vient de ce qu'il faut travailler dès le départ sur une géométrie déformée des trois branches pour pouvoir assurer l'équilibre statique, mais plusieurs choix de déformations sont possibles et doivent être faits en dehors du calcul à la rupture. Cette thèse était dirigée par P. de Buhan. Je n'ai pas joué de rôle dans l'encadrement doctoral à proprement parler, mais nous avons beaucoup interagi. Comme l'indique A. Corfdir au début de son mémoire : « *Une part importante de ce travail a été réalisée dans le cadre d'un programme de recherche rassemblant la société sidérurgique Arbed, le Bureau Veritas et le Service Central Technique des Ports Maritimes et des Voies Navigables. Ceci a permis de nombreux et très intéressants échanges de vue* » (Corfdir, 1997).

Essais de traction biaxiale sur éprouvettes représentant des palplanches triples. Ce fut le travail de ProfilArbed. Mais en amont, il fallait définir quelles configurations tester ? La détermination du plan d'expérience était absolument cruciale car les essais de traction étaient coûteux et le budget limité. Il fallait donc sélectionner les profils de test en conjuguant les angles de raccord, les nuances d'acier, les modes opératoires de soudage, les rapports de traction dans la palplanche principale et la demi-palplanche secondaire et leur évolution au cours du test pour simuler le remplissage des cellules, le choix du point de réaction, et le nombre d'essais à réaliser sur chaque profil de test pour corriger les erreurs d'expérimentation. Le pilotage de cette phase au sein du groupe a été très instructif : un plan d'expérience se bâtit par sa finalité. Nous avons passé beaucoup de temps à bâtir le plan d'expérience avec de nombreux allers-retours entre nous. Ont été privilégiés les angles de raccord (4 cas), les rapports de traction (3 cas), les efforts de préchargement de la cellule circulaire (3 cas) et les modes opératoires de soudage (2 cas). Sur un nombre théorique de profils de 72, un tiers ont été sélectionnés (21 exactement), soit 63 essais au total sachant qu'une combinaison est testée trois fois pour la répétabilité.

Modélisation numérique, comparaison avec les résultats théoriques et les essais de traction. Ce fut le travail du Bureau Veritas. Une approche multi-échelles a été mise en œuvre. Deux modèles ont été construits : un modèle local pour représenter la palplanche de raccord, un modèle global pour représenter la gabionnade, en fait (en tenant compte des symétries) un quart de cellule principale et un quart de la cellule de raccordement (Figure 4). Le modèle global s'étant montré plus performant à reconstituer les résultats des essais de traction, c'est celui-ci qui a été utilisé pour un ensemble de simulations paramétriques et permis de formaliser une nouvelle expression, inédite, de la résistance d'une palplanche d'angle

Synthèse d'une formule de résistance d'une palplanche d'angle. L'étude paramétrique ayant donné un nuage de points (324 cas de calcul), la dernière phase confiée au bureau Veritas a consisté à extraire

les paramètres les plus représentatifs pour écrire une formule analytique au meilleur compromis entre la représentation du « réel » (en fait la simulation numérique) et la simplicité d'usage, à l'issue d'une comparaison entre les résultats des essais, les résultats du modèle numérique et les expressions heuristiques de la littérature. Le facteur de réduction de la capacité de résistance d'une palplanche plate à la jonction d'une cellule de raccordement, β_T , s'écrit ainsi :

$$\beta_T = 0,9 \times \left(1,3 - 0,8 \times \frac{r_a}{r_m}\right) \times (1,0 - 0,3 \times \tan(\varphi_k)) \quad (19)$$

avec :

- r_a : le rayon de la cellule de raccordement
- r_m : le rayon de la cellule principale
- φ_k : l'angle de frottement interne du remblai des cellules

Le domaine de validité est défini par r_m compris entre 6 et 12 m, r_a / r_m compris entre 0,30 et 1,00, φ_k compris entre 20° et 40° et l'angle externe au point de jonction entre les deux cellules compris entre 30° et 90°.

On remarque que l'angle de frottement interne est défavorable. La raideur du remblai empêche en effet la déformation de la palplanche triple et lui rend plus difficile d'atteindre sa géométrie d'équilibre.

Avant validation finale, la formule a été testée sur une dizaine d'ouvrages gabionnés documentés dans la littérature afin de vérifier qu'elle ne faisait pas apparaître d'aberrations.

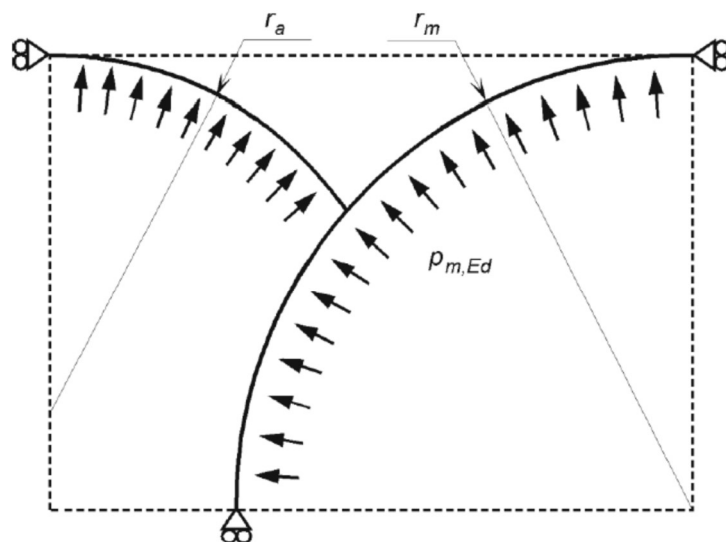


Figure 4. Modèle global de la gabionnade et schématisation des pressions dans les cellules (source : [48])

Outre la thèse d'A. Corfdir (1997), ce travail a été valorisé en privilégiant les praticiens. La valorisation académique ne constituait pas une priorité pour les membres du groupe. Le rapport de recherche [47] n'a pas été publié dans les collections du STCPMVN. En se basant sur ce document, un nouvel état-limite de défaut de résistance d'une palplanche de raccord sous sollicitation biaxiale a été introduit

dans l'EN 1993-1-5 [48], dans ROSA 2000 [3], dans les versions ultérieures des EAU. Ce n'est que récemment (2020) qu'une ingénieure d'Arbed a contacté les membres du groupe, mais certains étaient décédés, et a pris l'heureuse initiative de rédiger une synthèse en anglais des travaux dans un mémo interne.

2.2.2 Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés des sols

Dans les années 1990 la communauté géotechnique française discutait intensément des possibilités d'appliquer les méthodes statistiques et probabilistes en mécanique des sols (Photo 9), à la suite notamment des ouvrages de M. Cassan sur les essais *in situ* (Cassan, 1978) et de J.P. Magnan sur les analyses statistiques et modélisations probabilistes (Magnan, 1982).

Quels outils mathématiques utiliser pour appliquer concrètement la clause de l'EN 1997 sur les valeurs caractéristiques ? « *La valeur caractéristique d'un paramètre de sol ou de roche doit être choisie comme une estimation prudente de la valeur influençant l'occurrence de l'état-limite [...] Le paramètre qui contrôle le comportement de l'ouvrage est souvent une valeur moyenne sur une certaine surface ou un certain volume de sol. La valeur caractéristique est une estimation prudente de cette valeur moyenne. Lorsque des méthodes statistiques sont utilisées, il convient d'établir la valeur caractéristique de telle sorte que la probabilité calculée d'une valeur plus défavorable contrôlant l'occurrence de l'état-limite ne dépasse pas 5%.* » Telle était la question que nous nous posions, F. Baguelin, membre de la commission de normalisation de l'Eurocode 7, et moi-même, animateur du groupe de travail chargé d'élaborer les recommandations pour le calcul aux états-limites des ouvrages en site aquatique. Cette question était largement partagée par la commission française de normalisation des ouvrages géotechniques (miroir du CEN/TC 250/SC7), animée par JP Magnan.

En s'appuyant sur la théorie des champs aléatoires, F. Baguelin a eu l'idée de découper le problème de la valeur caractéristique en deux : d'abord la description probabiliste du paramètre ponctuel du sol ou de la roche, ou « paramètre local », puis la détermination de la valeur caractéristique elle-même comme un « paramètre étendu », moyenne du paramètre local sur un certain volume de sol, en prenant en compte la distance d'auto-corrélation du paramètre local dans le massif de sol ou de roche.

Pour tenter de mettre en application cette idée, nous nous sommes répartis le travail de la manière suivante. F. Baguelin présentait la méthode et la justifiait par le contexte particulier aux ouvrages géotechniques, en expliquant que la valeur caractéristique n'était plus une propriété intrinsèque du massif de sol contrairement aux propriétés de tous les autres matériaux abordés dans les Eurocodes, béton, aciers de renforcement, aciers de structure. Je développais la formalisation mathématique d'abord dans le cas simple d'une variable scalaire (une seule propriété étudiée dans la couche de sol), puis dans le cas plus complexe de variables multiples (une propriété comme la cohésion non drainée ou la pression limite pressiométrique variant avec la profondeur, ou deux propriétés étudiées ensemble et reliées par une relation linéaire comme la cohésion et l'angle de frottement drainé). Ceci a donné lieu à un stage pour tester et ajuster la méthode (Linglin, 1998) que nous avons co-encadré tous les deux.



Photo 9. Sondage géotechnique (Photo : Roctest)

Dans cette méthode, le paramètre local est représenté par deux valeurs :

- La « valeur moyenne inférieure » (Figure 5) est l'estimation de l'espérance de la loi de probabilité du paramètre local au risque de 25% (intervalle de confiance unilatéral à gauche, donc 75% de probabilité à droite, pour un paramètre favorable) ;
- La « valeur basse » (Figure 6) est l'estimation centrale du fractile à 5% de de la loi de probabilité du paramètre local.

La valeur caractéristique de la propriété du sol se situe quant à elle dans l'intervalle formé par la valeur moyenne inférieure et la valeur basse (Figure 7). Quand le volume de sol concerné est élevé et que les distances d'autocorrélation (en horizontal et en vertical) sont faibles, la valeur caractéristique se rapproche de la valeur moyenne inférieure. Quand le volume de sol concerné est faible et que les distances d'autocorrélation sont fortes, la valeur caractéristique se rapproche de la valeur moyenne basse. C'est la conséquence de la « réduction de variance ». Une formule était proposée utilisait les distances d'autocorrélation pour apprécier un « nombre de réalisations indépendantes » de la propriété géotechnique, dans le volume de sol concerné par l'état-limite.

Mais il faut toujours veiller à ce que les formules mathématiques n'altèrent l'esprit critique (de même que toute procédure que l'on peut suivre automatiquement, en quelque sorte). La méthode insiste pour que le dernier mot soit toujours laissé à l'appréciation éclairée du géotechnicien.

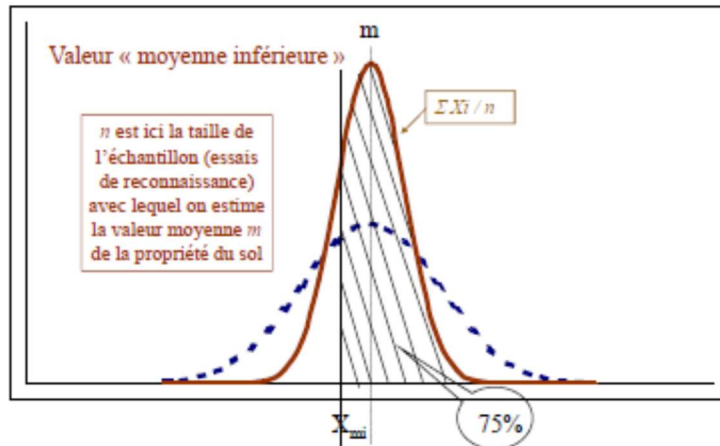


Figure 5. Valeur moyenne inférieure d'une propriété de sol (source : cours donné en M2 et [1])

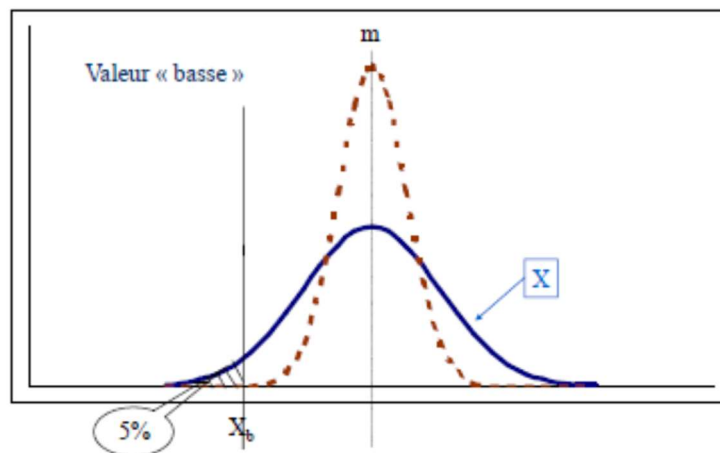


Figure 6. Valeur basse d'une propriété de sol (source : cours donné en M2 et [1])

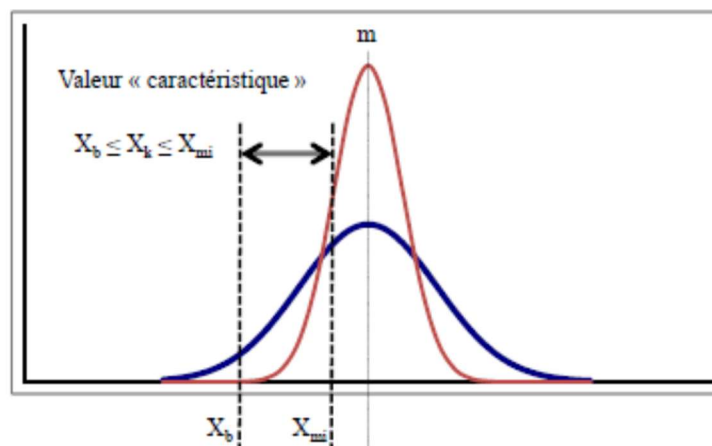


Figure 7. Valeur caractéristique d'une propriété de sol (source : cours donné en M2 et [1])

Dans le cas d'une variable scalaire, la solution mathématique est connue depuis longtemps et n'a rien de très original. Elle consiste de prendre la moyenne empirique et à retrancher un « certain » nombre

d'écart-types empirique selon le degré de risque ou le fractile souhaité. Quand on travaille sur l'estimation de l'espérance (valeur moyenne inférieure), l'écart-type empirique est multiplié par $\sqrt{1/N}$ (N étant le nombre des valeurs issues des essais). Quand on travaille sur l'estimation d'un fractile (valeur basse), il est préférable (c'est une amélioration qui a été apportée postérieurement à la publication de 2000) d'appliquer les formules de la statistique inférentielle pour un estimateur bayésien, c'est-à-dire de multiplier l'écart-type empirique par $\sqrt{1 + 1/N}$.

Bien qu'élémentaire, cet usage des mathématiques permet de mettre en évidence une règle très importante pour la conduite des projets : ne pas inciter à réduire les campagnes de reconnaissance géotechnique. En effet on voit qu'une réduction de la reconnaissance géotechnique (diminution du nombre N) équivaut mathématiquement à une augmentation de la variabilité du paramètre (augmentation du « σ apparent »).

Le cas des variables multiples était un peu plus complexe car il s'agissait, dans le cas de c' et $\tan(\varphi')$, de trouver les intervalles de confiance sur les coefficients de la régression linéaire qui relie les contraintes normales σ' et de cisaillement τ dans les essais triaxiaux : $\tau = c' + \tan(\varphi') \cdot \sigma'$; et dans le cas de la variation d'une propriété avec la profondeur (par exemple $c_u(z) = a + b \cdot z$), de trouver un intervalle de confiance de la propriété c_u pour chaque profondeur z .

Un choix doit être fait entre plusieurs hypothèses sur la forme de l'écart-type de la loi conditionnelle de la variable expliquée sachant la variable explicative : écart-type constant avec la profondeur (Figure 8), croissance linéaire de l'écart-type avec la profondeur (Figure 9), croissance linéaire de l'écart-type avec la profondeur et valeur nulle au niveau du terrain naturel (Figure 10).

Au final on parvient à représenter les résultats sous forme de trois droites :

- la droite de régression linéaire (classique) ;
- la droite « moyenne inférieure » : dans le cas de la résistance au cisaillement drainé, les coefficients a et b de la droite moyenne inférieure donnent les valeurs moyennes inférieures de c' et $\tan(\varphi')$; dans le cas de la variation de la cohésion non drainée avec la profondeur, cette droite donne directement la valeur moyenne inférieure de c_u ;
- la droite « basse », avec la même interprétation que ci-dessus.

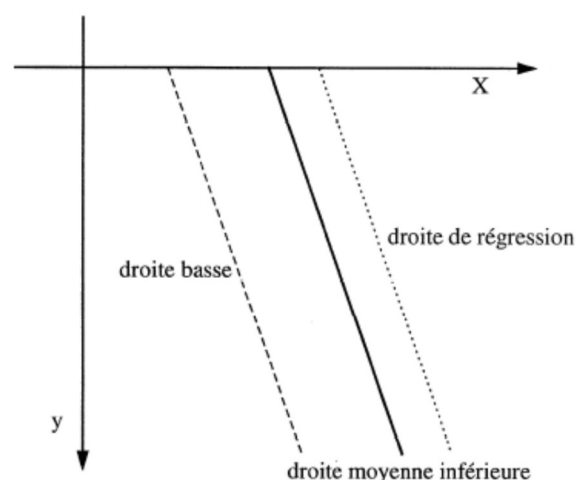


Figure 8. Droites représentatives d'une propriété géotechnique variant avec la profondeur sous hypothèse de constance de l'écart-type (source : [11])

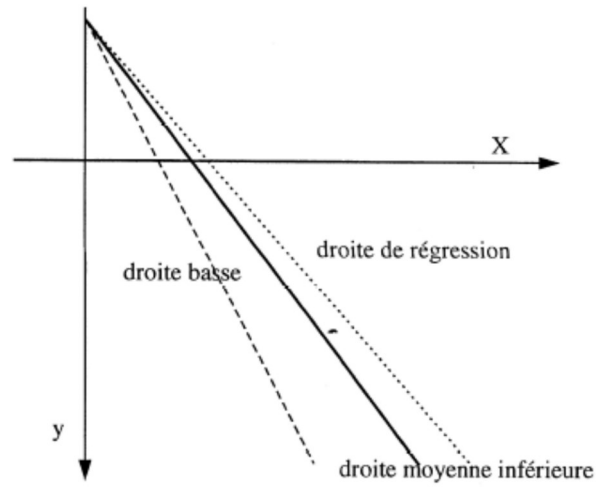


Figure 9. Droites représentatives d'une propriété géotechnique sous hypothèse de croissance linéaire de l'écart-type avec la profondeur (source : [11])

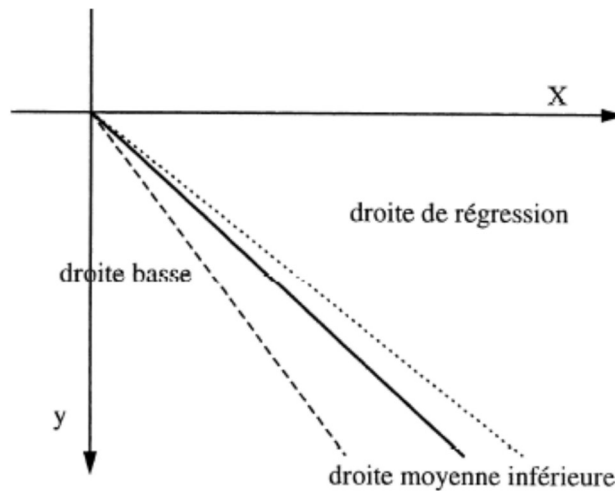


Figure 10. Droites représentatives d'une propriété géotechnique sous hypothèse de croissance linéaire de l'écart-type avec la profondeur et d'une valeur nulle au niveau du terrain naturel (source : [11])

Une fois cette méthode publiée, il restait à aborder une question très opérationnelle : la nouvelle approche des valeurs caractéristiques des propriétés des sols avec les Eurocodes conduisait-elle à des valeurs plus prudentes ou plus optimistes par rapport aux valeurs de sol « traditionnelles » ?

Cette question n'était pas très scientifique car les valeurs traditionnelles de sol dépendent avant tout de l'expertise de celui qui les propose. Mais l'occasion s'est présentée et j'ai pu opérer une comparaison sur un cas réel, avec les données de la reconnaissance géotechnique du projet de quai en Seine n°3 à Honfleur dont j'assurais la maîtrise d'œuvre. Les données de sol traitées initialement par le bureau d'études selon ses propres méthodes éprouvées ont été examinées par une autre société (indépendamment du marché de travaux, pour ne pas interférer avec les prises de responsabilité de la construction) selon la nouvelle approche des valeurs caractéristiques. Le résultat publié dans [28] et [29] montrait que la méthode des valeurs caractéristiques était plus sécuritaire s'agissant des pressions limites pressiométriques, plus optimiste s'agissant de la résistance au cisaillement drainé.

Bien sûr, impossible de faire une quelconque généralisation. Mais l'on avait montré que la nouvelle méthode ne donnerait normalement pas de résultats aberrants.

Cette recherche a donc débouché sur un compromis entre la préférence de l'Eurocode 1990 pour les méthodes statistiques et la primauté de l'expertise dans la détermination des « valeurs de sol ». Elle a été valorisée dans l'article [11] et les communications [28] et [29]. Surtout, la méthode a été recommandée explicitement dans les normes françaises d'application de l'Eurocode 7 : [52] NF P 94-261 (fondations superficielles), [51] NF P 94-262 (fondations profondes), [53] NF P 94-281 (murs), [49] NF P 94-282 (écrans).

Avec le recul et l'expérience, je rédigerais aujourd'hui l'article un peu différemment. Je laisserais les formulations mathématiques intermédiaires en annexe, je développerais l'aspect « aide à la décision » avec des exemples ancrés dans la réalité des projets.

2.2.3 *Elaboration d'un format de vérification semi-probabiliste pour le dimensionnement des digues verticales*

J'ai participé à toutes les phases du projet européen PROVERBS (*PRObabilistic Tools for VERTical BreakwaterS*) du 3^e PCRD (programme MAST, *Marine and Science Technology*) qui s'est déroulé sur trois ans de 1996 à 1999. Coordonné par l'université technique de Braunschweig (Allemagne), réunissant 23 partenaires ressortissant de 8 pays européens, ce projet a mobilisé une soixantaine de personnes.

Bien que depuis les années 1930 plusieurs digues-caissons aient connu des ruptures importantes de par le monde, cette conception continuait d'être une solution technique intéressante pour les grandes profondeurs d'eau (> 20 m), dans un contexte où l'augmentation de la taille et du tirant d'eau des navires poussait les autorités portuaires à agrandir leurs infrastructures vers le large. Le choix d'explorer les méthodes probabilistes était justifié quant à lui par le coût considérable de ces ouvrages, entre 100 et 350 M€ par kilomètre linéaire selon la profondeur, et par le coût encore plus considérable de reconstruction en cas de dommages, de l'ordre de 2 à 3 fois le coût initial (prenant en compte les difficultés de la démolition, ou sinon la nécessité de tout reconstruire sur site sans possibilité de préfabrication massive) : l'approche probabiliste donnait le cadre théorique permettant d'optimiser le coût global de l'opération.

Les objectifs de ce projet de recherche étaient de développer un format de prise en compte des risques pour le dimensionnement probabiliste des digues verticales et ouvrages monolithiques à la mer (Photo 10), comprenant un système de coefficients partiels cohérent avec les Eurocodes, dans l'idée de pouvoir transférer ultérieurement ces approches auprès des professionnels. Pour cela il était nécessaire d'approfondir les connaissances sur les interactions entre la houle et la structure, sur la réponse dynamique des ouvrages : forces hydrauliques générées par la houle sur les parois verticales pleines ou perforées, comportement des fondations (glissement, érosion, renversement...); et de gagner en précision sur la modélisation des efforts dans le génie civil de ces structures massives (Figure 11).

Le travail a été réparti en quatre phases (*tasks*) : aspects hydrodynamiques (*task 1*) coordonnés par W. Allsop (HR Wallingford, Royaume-Uni), aspects géotechniques (*task 2*) coordonnés par M.B. de Groot (Delft Geotechnics, Pays-Bas), aspects structuraux (*task 3*) coordonnés par R. Crouch (université

de Sheffield, Royaume-Uni), outils probabilistes (*task 4*) coordonnés par J.K. Vrijling (université de Delft, Pays-Bas). C'est sur ce projet que s'est construite la thèse de (Kortenhaus, 2003).

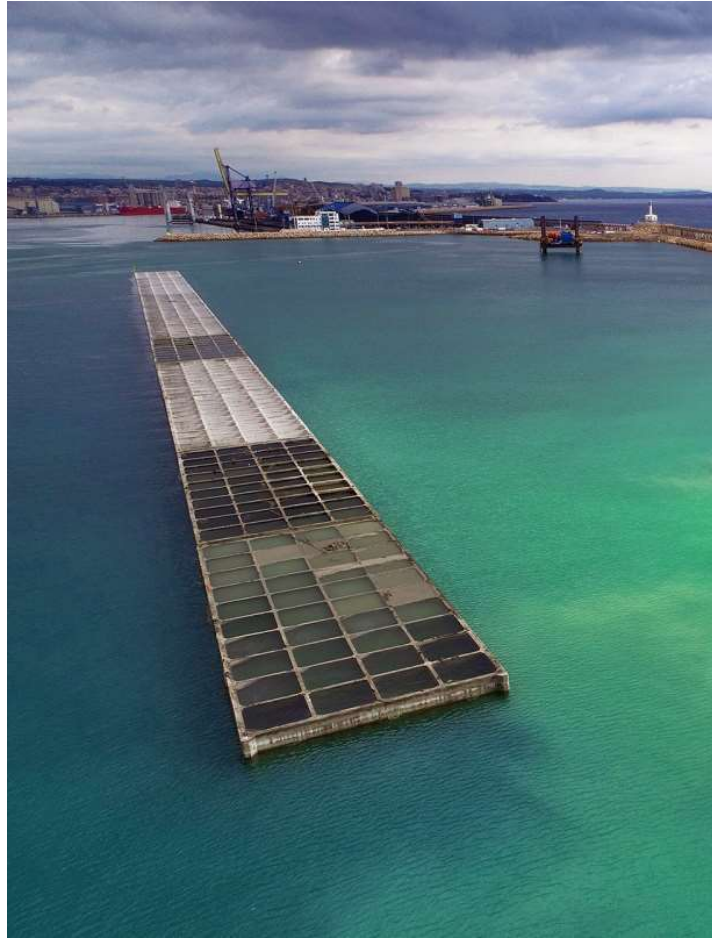


Photo 10. Construction d'une digue verticale en caissons au port de Tarragone, Espagne
(Photo : Autorité Portuaire de Tarragone)

La *task 3* était divisée de la manière suivante : limitation des méthodes existantes (3.1), comportement du caisson au moment de sa pose sur le fond marin (3.2), réponse de la structure aux charges d'impact hydraulique extrême (3.3), durabilité de long terme et fatigue (3.4). La sous-phase 3.1 était confiée à un sous-groupe formé de Sogreah (devenu depuis Artelia), pilote, avec le STCPMVN et le Bureau Veritas.

Au sein de ce sous-groupe la méthode de travail a été définie en trois étapes :

- le recensement bibliographique et la comparaison des principaux codes de calcul existants, sous la conduite du Bureau Veritas. Cinq codes ont été étudiés : le code américain de l'ACI pour les structures béton (1995), le code-modèle CEB-*fip* (1978), l'Eurocode 2 partie 1-1 (béton) et l'Eurocode 0 (bases du calcul), la norme britannique 6349 parties 1, 2 et 7 (1991), les recommandations espagnoles ROM relatives aux actions (1990). S'appuyant sur un outil d'analyse lexicale, la comparaison portait sur les fondamentaux du code (risques admissibles, prise en

compte des incertitudes, méthode de calcul des coefficients de sécurité), sur le format d'analyse de risque (situations, états-limites, combinaisons), sur les méthodes de calcul pour l'ingénierie (choix des modèles pour les actions, choix des modèles pour les résistances) ;

- l'étude de la sensibilité du dimensionnement de la structure béton armé (intensité du ferrailage) aux périodes de retour de la houle et l'identification des états-limites dimensionnants (entre l'ELS de durabilité qui limite la traction dans les aciers de renforcement, et l'ELU de résistance qui limite les efforts dans le béton et la déformation des aciers), sous la conduite de Sogreah (devenu Artelia). Un modèle numérique a été utilisé en reprenant un exemple de caisson perforé ;
- l'identification des limitations des codes existants, des questions-clé et la proposition d'un format de synthèse, sous la conduite du STCPMVN, c'est-à-dire moi-même, avec un appui des collègues de Compiègne.

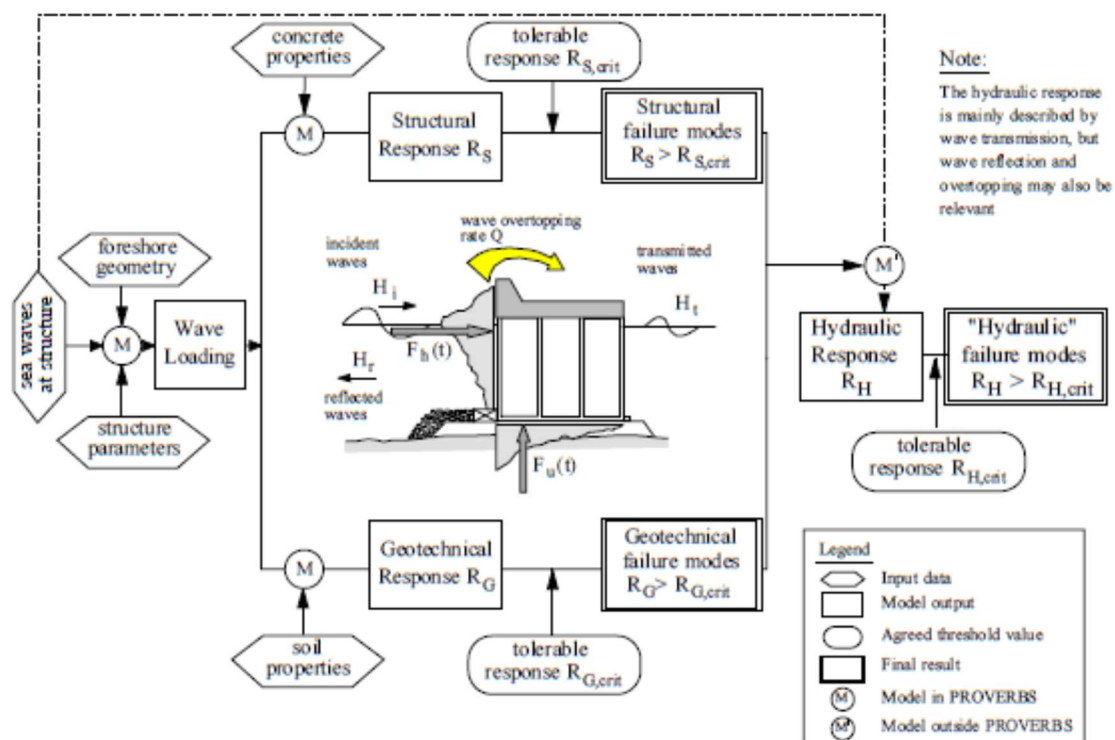


Figure 11. Problématique de dimensionnement d'une digue verticale dans le projet PROVERBS (source : [2])

En cohérence avec mon travail sur les Eurocodes, j'ai abordé cette question de recherche en examinant la pertinence du format semi-probabiliste aux états-limites des Eurocodes. J'ai relevé les convergences ainsi que les écarts les plus marqués avec les autres codes en me basant sur l'analyse conduite par le Bureau Veritas (convergences sur les situations de projet et les modèles de calcul, écarts sur les niveaux de sécurité des valeurs de projet, sur les valeurs des coefficients partiels et sur les endroits où les appliquer). J'ai pris en compte les résultats de Sogreah (devenu Artelia) recommandant de positionner la période de retour de la houle à 10 ans pour vérifier les ELS et à 100 ans pour vérifier les ELU.

Mon travail a débouché sur une proposition de structure pour un code de calcul des digues verticales couvrant de l'ensemble des items utiles :

- Généralités : durée de vie, situations de projet, niveaux de sécurité (indices de fiabilité cible sur la durée de vie : de 0,5 à 1,5 pour les ELS, de 1,5 à 3,0 pour les ELU), cas de charge, définition de plusieurs sortes de coefficients partiels :

$$\gamma_n \times \gamma_{Sd} \times E(\gamma_f \times F_k) \leq \frac{R_d}{\gamma_{Rd}} \quad (20)$$

où γ_n était un coefficient d'importance *ad hoc* permettant d'ajuster le niveau de sécurité global au contexte de chaque digue étudiée.

- Conditions contractuelles : responsabilité de l'entreprise, inspection, conduite à tenir en cas de défaut de construction ;
- Actions : charges permanentes, niveaux d'eau, houle, courants, pressions exercées par le remblai à l'intérieur du caisson, combinaisons d'actions : pour toutes ces actions, quelles définitions de la valeur caractéristiques (10 ans pour la houle et les niveaux d'eau) et de la valeur de calcul (coefficient partiel entre 1,0 et 1,20 sur la hauteur de la houle significative) ;
- Résistances et propriétés des matériaux : béton et armatures métalliques, paramètres géotechniques, paramètres de frottement entre la base et le remblai : là aussi valeurs caractéristiques et valeur de calcul en regardant du côté de l'EN 1992 et de l'EN 1997 ;
- Analyse mécanique : équilibre statique, analyse structurale ;
- Etats-limites : ELU (capacité portante, glissement, renversement, résistance du béton armé), ELS (durabilité du béton armé, tassement, agitation du plan d'eau protégé par la digue) ;
- Autres dispositions : enrobage, joints, ballastage des caissons, préparation de l'assise, spécifications des matériaux, préfabrication, tolérances d'exécution.

La sous-phase 3.1 avait vocation à contribuer aux entrées (*inputs*) de la *task 4*, mais elle s'est retrouvée en concurrence avec la sous-phase 4.1e « Concepts/philosophie de la sécurité, méthodes pour la détermination des probabilités admissibles de ruine et la sous-phase 4.2e « Développement d'un code de niveau I » (c'est-à-dire aux coefficients partiels). Le projet s'est retrouvé avec au total trois philosophies différentes de la sécurité :

- ma contribution, adaptant à la houle le format semi-probabiliste des Eurocodes et compatible avec les coefficients de sécurité sur le béton armé et sur le sol déjà proposés dans les normes européennes ;
- la contribution de l'université d'Aalborg, mettant en œuvre le calage probabiliste sur une population d'ouvrage (cf. section 2.2.2) et reprenant « à zéro » tous les coefficients partiels, avec une décomposition de ceux-ci selon les sources d'incertitudes, dans la ligne des travaux publiés à l'AIPCN par les mêmes auteurs ;
- la contribution de l'université de Delft, mettant en œuvre un calage des coefficients partiels par optimisation économique du coût global de la digue.

Ainsi le format « danois » (université d'Aalborg) comprenait-il :

- Quatre classes de sécurité (faible, moyenne, élevée, très élevée) ;
- Trois durées de vie de la digue (20-50-100 ans) ;

- Des valeurs de probabilité admissibles de ruine pour les ELU et pour les ELS sur la durée de vie de l'ouvrage, correspondant à chacune des 4 classes de sécurité ;
- Valeur caractéristique : l'espérance de la plus haute vague (H_{max}) sur la durée de vie de la digue, c'est-à-dire la H_{max} dont la période de retour correspond à la durée de vie de la digue ;
- Coefficient partiel appliqué à la hauteur de houle : $\gamma_H = \gamma_{H0} \times \gamma_T \times \gamma_{H2}$, où γ_{H0} prend en compte l'incertitude intrinsèque sur les hauteurs de houle (régime des tempêtes), γ_T prend en compte l'incertitude sur la durée de vie de l'ouvrage, γ_{H2} prend en compte l'incertitude sur la modélisation de l'effort exercé sur la structure (modèles physiques, modèles numériques, formules analytiques) ;
- Coefficient partiel appliqué aux résistances : $\gamma_m = \gamma_0 \times \gamma_1 \times \gamma_2 \times \gamma_3$, où γ_0 prend en compte l'incertitude intrinsèque sur la variabilité du paramètre de matériau considéré, γ_1 permet de différencier la sécurité selon la classe de sécurité de la digue, γ_2 prend en compte l'incertitude sur le modèle de résistance utilisé, γ_3 module le coefficient de sécurité selon l'importance du contrôle d'exécution.

Le format « néerlandais » (université de Delft) recherchait les coefficients partiels qui conduiraient à un dimensionnement de la digue minimisant sa fonction de coût $I(\underline{x})$:

$$I(\underline{x}) = I_0 + I_c(\underline{x}) + \sum_{n=1}^N \left(\frac{365 \times C_{SLS} \times p_{f,SLS}(\underline{x}) + C_{ULS} \times p_{f,ULS}(\underline{x})}{(1+r'-g)^n} + \frac{C_{maint}}{(1+r')^n} \right) \quad (21)$$

avec :

- \underline{x} : le vecteur des variables de dimensionnement (largeur, hauteur, profondeur du caisson)
- $I_0 + I_c(\underline{x})$: le coût initial de construction
- C_{SLS} : le coût journalier en cas d'occurrence d'un ELS (comme la perte de recettes dans l'hypothèse d'une exploitation dégradée du port protégé par la digue)
- C_{ULS} : le coût induit par l'occurrence d'un ELU (comme la reconstruction de la digue)
- $P_{f,SLS}$: la probabilité quotidienne d'occurrence d'un ELS
- $P_{f,ELU}$: la probabilité annuelle d'occurrence d'un ELU
- C_{maint} : le coût annuel de maintenance de la digue
- r' : le taux d'actualisation annuel
- g : le taux de croissance annuel
- N : durée de vie de la digue, en nombre d'années

Lors des discussions en *workshops* pléniers annuels, les membres du consortium se montraient partagés entre la calibration des coefficients de sécurité à partir d'indices de fiabilité (ou de probabilités de ruine) cibles, la justification probabiliste des ouvrages sans coefficients partiels (c'est-à-dire en recherchant directement et pour chaque projet d'ouvrage à respecter les indices de fiabilité ou probabilité cibles de ruine), et la recherche d'optima socio-économiques à partir des analyses en coût global « Investissement, Maintenance & Réparations ».

Il fallait encore que j'acquière de l'expérience... les universités de Delft et d'Aalborg étaient représentées par des « pointures »... et malgré le soutien personnel que m'a apporté à plusieurs reprises le coordinateur allemand de PROVERBS – ce dont je lui suis extrêmement reconnaissant, je n'ai pas réussi à convaincre la *task 4* de l'intérêt de se rapprocher le plus possible du format des normes européennes.

Au final, même si aucun « format de sécurité » réutilisable dans les Eurocodes n’aura vraiment émergé du projet de recherche, l’apport de PROVERBS aura été considérable pour faire progresser l’ingénierie des ouvrages maritimes : en premier lieu l’élaboration d’un modèle totalement inédit des forces d’impact de la houle sur les structures verticales (*task 1*), la compréhension de la réponse dynamique du sol et des pressions interstitielles (*task 2*), la faisabilité de la méthode des éléments finis tridimensionnels à l’analyse structurale des caissons remplis de sables et graviers (*task 3*), enfin la clarification (positions respectives) des quatre méthodes de prise en compte de l’incertain par les coefficients globaux (méthode déterministe), par les coefficients partiels (méthode semi-probabiliste), par les probabilités cibles de ruine (méthode probabilité), par l’optimisation économique (analyse des risques).

Tous ces travaux ont été valorisés dans l’ouvrage PROVERBS [2].

Pendant quatre ans j’ai participé à toutes les phases de ce projet de recherche européen et à tous les workshops dans des localités qui n’étaient pas les pires (Las Palmas, Naples, Aalborg, Caen). J’ai découvert la complexité de la gestion de ces grands consortia de recherche. J’ai pris conscience des enjeux de pouvoir présents jusque dans les discussions scientifiques. J’ai élargi ma compréhension des méthodes de prise en compte de l’incertain par les analyses économiques en coût global.

2.2.4 Etude d’un format de sécurité semi-probabiliste pour les ouvrages côtiers

Bien qu’il ne s’agisse pas d’une opération de recherche au sens académique du terme mais d’un travail « prénormatif » (réalisé, en fait, pendant les travaux du groupe de travail de normalisation, dont la durée en a été rallongée), j’en insère ici la description dans la continuité de la section 2.2.3 sur PROVERBS car ce travail lui est complètement lié. Les échanges au sein du groupe de travail de normalisation et un travail spécifique mené au sein de la délégation française (F. Ropert pour le Cerema, L. Hamm et A. Hafid pour Artelia, moi-même pour l’université Gustave Eiffel) ont permis de converger vers une application raisonnée du format des Eurocodes, avec plusieurs apports innovants (périodes de retour d’accompagnement, périodes de retour jointes) pour prendre en compte les différentes sources d’incertitudes affectant la houle (Goda, 1998).

Prise en compte des états-limites hydrauliques

L’ingénierie hydraulique formule habituellement les critères de justification à l’aide de nombres adimensionnels. Prenons deux exemples pour les digues maritimes à talus (Photo 11) et les protections de berges fluviales.

- Etat-limite d’instabilité hydraulique des blocs de protection sous l’action de la houle :

$$N_s \leq N_{s,lim} \quad (22)$$

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta \times D_n} \quad (23)$$

où N_s est le nombre adimensionnel de stabilité, H_s est la hauteur significative de la houle, D_n est le diamètre nominal des blocs et Δ la densité déjaugée relative des blocs.

et $N_{s,lim}$ est la valeur limite acceptable du nombre de stabilité, qui dépend du niveau de dommage admissible. Plusieurs formules ont été proposées par les auteurs, par exemple :

$$N_{s,lim} = (K_D \times \cot(\alpha))^{1/3} \quad (24)$$

C'est la classique formule d'Hudson, où α est la pente du talus de la digue et K_D est le coefficient de stabilité d'Hudson qui dépend du type de bloc et du niveau de dommage admissible, dont la valeur est déterminée par des essais sur modèles réduits physiques.

Ou encore,

$$N_{s,lim} = c_s \times P^{-0.13} \times \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \times \left(\frac{H_s}{H_{2\%}}\right) \times \sqrt{\cot(\alpha)} \times \xi_{S-1,0}^P \quad (25)$$

C'est l'une des formules de van der Meer pour les vagues déferlantes en eau peu profonde (Rock Manual, 2007, équation (5.140)), où S_d est le niveau de dommage admissible, N est le nombre de vagues dans une tempête, P est la perméabilité de la structure de digue, c_s est un paramètre d'ajustement, $H_{2\%}$ est la hauteur dépassée par 2% des vagues, α est la pente de la digue et $\xi_{S-1,0}^P$ est le paramètre d'Iribarren.



Photo 11. Désordres de la protection du musoir de l'épi « Arrêt de sable », port de Cotonou, Bénin (Photo : CDR International B.V.)

- Etat-limite d'instabilité hydraulique des blocs de protection sous l'action du courant (également applicable aux protections de berge dans les fleuves et canaux de navigation) :

$$U_I \leq U_{I,lim} \quad (26)$$

$$U_{I,lim} = \frac{v^2}{2g \times \Delta \times D_n} \quad (27)$$

où U_I est le nombre adimensionnel d'Isbach, V est la vitesse du courant, D_n est le diamètre nominal des blocs et Δ la densité déjaugée relative des blocs, g est l'accélération de la pesanteur.

et $U_{I,lim}$ est la valeur limite acceptable du nombre d'Isbach, qui dépend là aussi de plusieurs paramètres comme par exemple :

$$U_{I,lim} = \frac{\psi_{crit} \times k_{sl}}{0.035 \phi_{sc} \times k_h \times k_t^2} \quad (28)$$

C'est la formule proposée par Pilarczyk (Rock Manual, 2007, équation (5.219)) dans laquelle ψ_{crit} est un paramètre de mobilité admissible de l'élément de protection, ϕ_{sc} est un coefficient de correction de la stabilité, k_f est un facteur de turbulence, k_h est un facteur de profil de vitesse et k_{sl} est un facteur de talus latéral.

Au début des discussions, ces formulations des critères de justification hydraulique ne semblaient pas compatibles avec les Eurocodes. Pour s'ajuster au format des Eurocodes, les états-limites ultimes devaient-ils obligatoirement être présentés sous une forme séparant l'effet des actions (ou charge) et la résistance ?

$$\text{Effet des actions} \leq \text{Résistance} \quad (29)$$

En effet cette forme de condition d'état-limite est celle qui permet d'appliquer des coefficients de sécurité partiels aux actions et aux résistances, et partant de s'inscrire complètement dans le format semi-probabiliste des Eurocodes.

Autre objection soulevée par le groupe de travail de normalisation, comme les nombres adimensionnels mettent ensemble des paramètres décrivant l'action de milieu marin ou fluvial et des paramètres propres aux éléments de protection, les charges (*loads*) ne sont pas définies, ni les résistances. Etait-il toujours raisonnable de vouloir appliquer les Eurocodes ?

Un certain temps a été pris pour prendre collectivement conscience que les Eurocodes n'excluaient pas d'autres formes pour les conditions d'état-limite, comme :

$$\text{Effet des actions} \leq \text{Valeur limite} \quad (30)$$

On retrouve la forme pratiquée dans le dimensionnement hydraulique, à cette différence que les Eurocodes semblaient la réserver aux états-limites de service (où les coefficients de sécurité partiels n'interviennent pas) mais pas pour les états-limites ultimes.

J'ai proposé un schéma de justification dans lequel les critères de vérification hydrauliques seraient considérés comme autant de conditions d'état-limite de forme « effet des actions \leq valeur limite », et dans lesquels l'incertain sur les actions serait pris en compte non par les couples (valeurs caractéristiques, coefficients de sécurité), mais par des périodes de retour des états de mer (tempêtes) ou des débits fluviaux (hauteurs et périodes de houle, vitesses de courant). Ces périodes de retour devaient être raisonnables pour être assimilées à des « périodes de retour caractéristiques » pour vérifier les ELS, elles devaient être élevées pour être assimilées à des « périodes de retour de calcul » pour vérifier les ELU. L'utilisation des périodes de retour comme alternative aux coefficients partiels pour la détermination directe des valeurs de calcul des paramètres météocéaniques avait l'avantage de donner des valeurs réellement adaptées à chaque site.

De même les valeurs limites apparaissant à droite des conditions d'état-limite, liées aux déplacements ou aux taux de dommage admissibles, devaient être déterminées de façon sévère pour vérifier les ELS (faibles déplacements, début de dommage), moins sévère pour vérifier les ELU (déplacements plus importants, limite de ruine).

Le débat a agité le groupe sur la question de l'introduction des « valeurs limites » dans la norme. Le mandat étant initialement donné pour travailler sur les actions, englobait-il les valeurs limites qui reflètent des exigences de comportement des ouvrages ? Il y avait du pour et du contre. Au final la prEN 1991-1-8 propose dans une annexe informative les valeurs admissibles pour les états-limites de début de dommage (ELS) et de limite de ruine (ELU) tirées de la littérature.

L'analyse systématique du dimensionnement des ouvrages à talus a mis en évidence une question latérale non résolue (hors du champ du groupe de travail de normalisation sur les actions). De quel domaine relève la stabilité interne (structurale) des enrochements, d'un dimensionnement de génie civil ou d'une spécification comme un produit de construction ? A ce stade, en l'absence de critère de justification *ad hoc* au niveau de la maîtrise d'œuvre de projet, le groupe de travail présume une absence d'état-limite, au sens strict du terme. Mais aucune norme ne vient encadrer la mise sur le marché des blocs de protection.

Probabilités-cibles

J'ai exploité les éléments de PROVERBS sur les probabilités cibles de ruine pour la norme prEN 1991-1-8, afin de justifier les valeurs des indices de fiabilité à prendre en compte dans le calcul des périodes de retour des actions du milieu marin pour les ELS d'une part, pour les ELU hydrauliques d'autre part. J'ai pris en considération les travaux plus récents de l'AIPCN (2019) sur les digues verticales et à talus et les valeurs proposées par l'EN 1990 Annexe C. Les résultats sont présentés dans les Figures 12 et 13 suivantes.

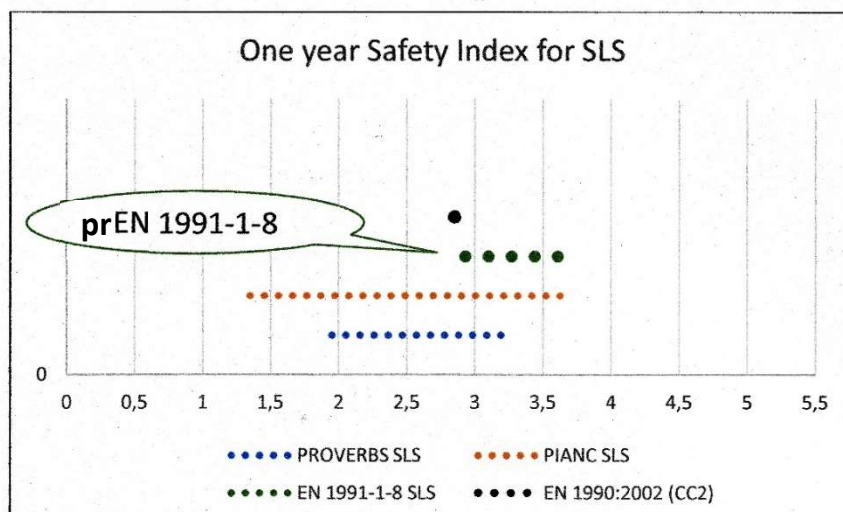


Figure 12. Comparaison des indices de fiabilité cibles sur 1 an des états-limites de service des digues maritimes selon différentes sources (source : [7])

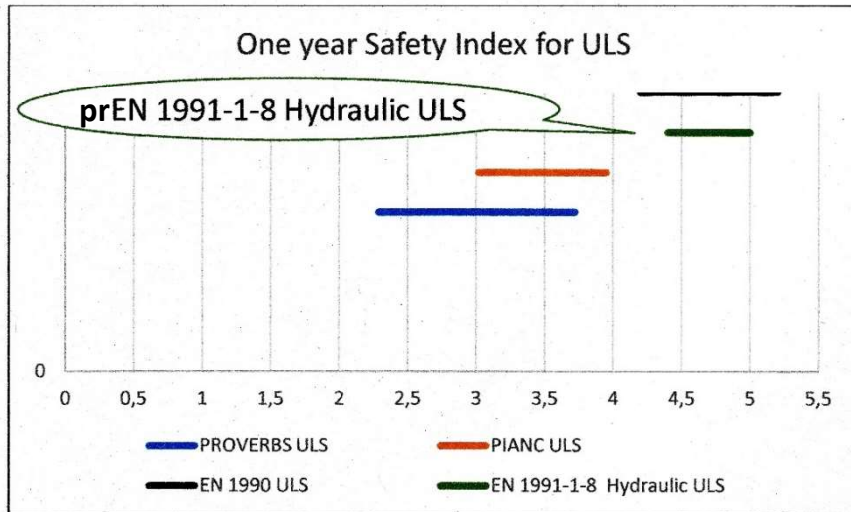


Figure 13. Comparaison des indices de fiabilité cibles sur 1 an des états-limites ultimes des digues maritimes selon différentes sources (source : [7])

Cette analyse probabiliste comparative montre des niveaux de sécurité cible relativement élevés dans la nouvelle partie d'Eurocode en comparaison avec la pratique existante, notamment pour les états-limites ultimes.

Prise en compte des dépendances entre paramètres météocéaniques

La combinaison des hauteurs et périodes de vagues et des niveaux d'eau pour les ouvrages à la côte était restée une question irrésolue dans la littérature. Pratiquement les ingénieries mettaient en œuvre leur expertise pour choisir un paramètre météocéanique dominant au large, correspondant à une période de retour X et la combinaient avec un autre paramètre météocéanique d'accompagnement au large, correspondant à une période de retour $X' < X$, et vice-versa. Puis ils propageaient les deux états de mer à la côte et calculaient les réponses de l'ouvrage.

Plusieurs objections étaient soulevées à l'encontre de cette approche : pas de prise en compte explicite du degré de dépendance ou de corrélation entre les paramètres (sauf expertise du chargé de projet), pas de consensus sur les périodes de retour à prendre en compte, enfin les résultats n'étaient pas les mêmes si l'on faisait des statistiques (périodes de retour) les réponses des ouvrages ou sur les paramètres météocéaniques au large.

En se basant sur les travaux de (Mazas, 2017) nous avons proposé de prendre en compte les dépendances entre paramètres météocéaniques par l'utilisation de périodes de retour jointes, et non plus marginales comme pensé à l'origine dans l'EN 1990.

Considérons deux variables aléatoires X et Y , corrélées, de fonctions de répartition marginales $F_X(x)$ et $F_Y(y)$, de fonction de répartition jointe $F_{XY}(x, y)$. Par exemple X et Y sont les maxima annuels de deux paramètres météocéaniques en un point donné (hauteur de houle et niveau d'eau). Pour simplifier la présentation on suppose dans la suite que les maxima annuels de X et Y peuvent se produire en même temps (c'est bien sûr faux dans la réalité, mais le biais va dans le sens de la sécurité).

Les périodes de retour marginales RPm des valeurs x de la variable aléatoire X , et y de la variable aléatoire Y , sont :

$$RPm(x) = \frac{1}{Prob(X>x)} = \frac{1}{1-F_X(x)} \quad (31)$$

$$RPm(y) = \frac{1}{Prob(Y>y)} = \frac{1}{1-F_Y(y)} \quad (32)$$

On choisit de définir la période de retour conjointe RPj des deux valeurs x et y par :

$$RPj(x, y) = \frac{1}{Prob(X>x \text{ ET } Y>y)} = \frac{1}{1+F_{XY}(x,y) - F_X(x) - F_Y(y)} \quad (33)$$

La dépendance entre les variables aléatoires X et Y est modélisée par une copule de Gumbel-Hougaard, de paramètre m :

$$F_{XY}(x, y) = \exp \left\{ - \left(\left(-\ln(F_X(x)) \right)^m + \left(-\ln(F_Y(y)) \right)^m \right)^{\frac{1}{m}} \right\} \quad (34)$$

Il s'ensuit la relation entre les périodes de retour marginales et jointes :

$$\frac{1}{RPj(x,y)} = \frac{1}{RPm(x)} + \frac{1}{RPm(y)} - 1 + \exp \left\{ - \left(\left(-\ln \left(1 - \frac{1}{RPm(x)} \right) \right)^m + \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{RPm(y)} \right) \right)^m \right)^{\frac{1}{m}} \right\} \quad (35)$$

C'est cette relation que j'ai utilisée pour caler des périodes de retour jointes cohérentes avec les périodes de retour marginales issues des niveaux de sécurité reconnus acceptables, pour différents cas de dépendance (Tableaux 7 et 8).

Le point de départ du calcul des valeurs caractéristiques a été établi par consensus au sein du groupe sur les périodes de retour de 50 ans (classe de conséquence CC1), 100 ans (classe de conséquences CC2) et 200 ans (classes de conséquences CC 3). Avec un coefficient d'influence $\alpha_s = -0.7$ pour un paramètre dominant au sens de l'annexe C de l'EN 1990, on en déduit les indices de fiabilité cibles pour les ELS de 2.93 (CC1), 3.32 (CC2) et 3.68 (CC3), cohérente avec la valeur de l'EN 1990 :2002. Le consensus sur la période de retour marginale de combinaison s'est porté sur la valeur de 10 ans pour la CC2 avec une dépendance moyenne ($m = 1,07$). Les autres valeurs des Tableaux 7 et 8 s'en déduisent avec l'équation (35), ainsi que le coefficient d'influence α_s autour de -0.39 pour le paramètre d'accompagnement et le facteur d'importance φ_i qui indique de combien il faut multiplier la période de retour (marginale ou jointe) caractéristique (paramètre dominant) de la CC2 pour passer à celles des autres classes de conséquence.

Le point de départ pour la détermination des valeurs de calcul était l'indice de fiabilité cible sur 1 an de 4,7 pour la CC2 indiqué dans l'EN 1990. Avec le même coefficient d'influence $\alpha_s = -0.7$ pour un paramètre dominant on en déduit la période de retour marginale de calcul pour la CC2. En reprenant les valeurs des facteurs d'importance φ_i on détermine les périodes de retour marginales de calcul pour la CC1 et CC3. On en déduit les indices de fiabilité cibles pour ces classes de conséquence, qui se révèlent positionnées dans une fourchette plus resserrée que les valeurs de l'EN 1990. Le coefficient

d'influence α_s de -0.39 pour le paramètre d'accompagnement permet de calculer les périodes de retour de combinaison, puis les périodes de retour jointes de calcul.

Les Tableaux 5 et 6 indiquent les valeurs du paramètre de la copule de Gumbel-Hougaard utilisées dans cette démarche dans la lignée des travaux de (Mazas, 2017).

Valeur du paramètre (m) de la copule de Gumbel-Hougaard	Degré de dépendance
$m > 1,20$	Très forte dépendance
$1,10 < m < 1,20$	Forte dépendance
$1,05 < m < 1,10$	Dépendance moyenne
$m < 1,05$	Faible dépendance

Tableau 5. Appréciation de degré de dépendance des paramètres météocéaniques selon la valeur du paramètre (m) de la copule de Gumbel-Hougaard (source : [57])

	Faible dépendance	Dépendance moyenne	Forte dépendance	Très forte dépendance
m	1,03	1,07	1,12	1,22
Ces valeurs de m proviennent d'une analyse statistique des états de mer dans la Baie de Somme (faible dépendance), dans le Pertuis Charentais (dépendance moyenne) et au large de Brest (très forte dépendance). Une valeur intermédiaire de forte dépendance a été introduite pour compléter la série.				

Tableau 6. Valeurs du paramètre (m) de la copule de Gumbel-Hougaard considérées pour les périodes de retour de combinaison (source : [7])

L'ouverture des Eurocodes à l'ingénierie hydraulique et à ses méthodes propres de prise en compte de l'incertain mettait en évidence un autre décalage avec le format de sécurité classique. Là où l'EN 1990 introduisait un facteur de conséquence k_f pour moduler uniquement les coefficients partiels intervenant dans la formation de la valeur de calcul (et donc dans les ELU), il devenait nécessaire d'autoriser une différenciation des valeurs caractéristiques des actions du milieu marin selon la classe de conséquence des ouvrages (donc d'autoriser que les indices de fiabilité cibles des ELS soient différents selon la classe de conséquence). C'était une innovation encore jamais tentée dans l'EN 1990 ! Pour rendre la transition acceptable, le CEN/TC 250/SC 10 MG eut l'idée de reprendre un mécanisme de l'EN 1998 sur le calcul sismique et d'introduire un « facteur d'importance » φ_i qui permettait de « sauver la face » en ne faisant apparaître qu'une seule période de retour marginale caractéristique (100 ans en CC2), les autres périodes de retour étant calculées avec le φ_i .

Consequence class	Importance factor (φ_I) ^a	Characteristic marginal return period (leading metocean parameter) ^b	Combination marginal return period (accompanying metocean parameter) ^c	Characteristic joint return period ^d
CC3	2,0	200 y	Very High dependence: 140 y	700 y
			High dependence: 40 y	
			Medium dependence: 13 y	
			Low dependence: 6 y	
CC2	1,0	100 y	Very High dependence: 70 y	350 y
			High dependence: 25 y	
			Medium dependence: 10 y	
			Low dependence: 5 y	
CC1	0,5	50 y	Very High dependence: 40 y	175 y
			High dependence: 15 y	
			Medium dependence: 8 y	
			Low dependence: 4 y	

^a The importance factor is given in Table 4.4 (NDP).

^b The characteristic marginal return period is equal to the value given in 4.7.2(1) multiplied by the importance factor.

^c When the degree of dependence is not known, the "medium dependence" figure can be used.

^d The characteristic joint return period is equal to the value given in 4.7.2(2) multiplied by the importance factor. Figures are valid for a two-variable joint analysis only.

Tableau 7. Périodes de retour marginales caractéristiques et de combinaison et périodes de retour jointes dans le projet d'EN 1991-1-8 (source : [57])

Consequence class	Importance factor (φ_1) ^a	Design marginal return period (leading metocean parameter) ^b	Design combination marginal return period (accompanying metocean parameter) ^c	Design joint return period ^d
CC3	2,0	4 000 y	Very High dependence: 1 800 y	12 000 y
			High dependence: 370 y	
			Medium dependence: 45 y	
			Low dependence: 6 y	
CC2	1,0	2 000 y	Very High dependence: 900 y	6 000 y
			High dependence: 190 y	
			Medium dependence: 30 y	
			Low dependence: 6 y	
CC1	0,5	1 000 y	Very High dependence: 450 y	3 000 y
			High dependence: 100 y	
			Medium dependence: 18 y	
			Low dependence: 5 y	
<p>^a The importance factor φ_1 is given in Table 4.4 (NDP).</p> <p>^b The design marginal return period is equal to the value given in 7.2.3(1), Note 1 multiplied by the importance factor φ_1.</p> <p>^c When the degree of dependence is not known, the "medium dependence" figure can be used</p> <p>^d The design joint return period is equal to the value given in 7.2.2(1), Note 2 multiplied by the importance factor φ_1. Figures are valid for a two-variable joint analysis only.</p>				

Tableau 8. Périodes de retour marginales de calcul et de combinaison et périodes de retour jointes dans le projet d'EN 1991-1-8 (source : [57])

On constate, et c'est une conséquence logique des Figures 12 et 13 plus haut, que si les périodes de retour caractéristiques de la prEN 1991-1-8 (Tableau 7) sont cohérentes avec les valeurs de la littérature, en revanche les périodes de retour de calcul – déterminées de manière à assurer une cohérence interne entre ouvrages dimensionnés avec les Eurocodes (Tableau 8) – se révèlent beaucoup plus élevées : 2000 ans (en classe de conséquence 2) contre une valeur usuelle de 400 ans rencontrée sur bon nombre d'ouvrages existants.

Coefficients partiels

On notera que les périodes de retour de calcul ci-dessus ne sont utilisées que pour les états-limites hydrauliques. Pour la vérification des états-limites structuraux et géotechniques, les conditions d'état-limite prennent la « bonne » forme : « action < résistance », et l'on sait appliquer les coefficients partiels.

Mais vu que l'on avait défini la valeur caractéristique comme celle dont la période de retour était de 100 ans (CC2), quel coefficient partiel retenir pour les ELU de capacité portante, de glissement sur la base, de résistance des structures béton ?

L'application directe des Eurocodes aurait conduit à la valeur usuelle pour les actions variables $\gamma_Q = 1,50$.

Selon les règles de la construction *offshore*, un coefficient partiel de 1,30 était appliqué aux conditions marines centennales. La construction *offshore* ne relève pas des Eurocodes mais de normes internationales reprises dans la collection européenne (série ISO EN 19-900). Le souhait du groupe de travail de normalisation de rester dans une certaine cohérence avec l'*offshore* déboucha vers le compromis d'un coefficient de 1,35, identique à celui des actions permanentes, appliqué aux conditions marines caractéristiques pour former la valeur de calcul des charges appliquées sur les ouvrages côtiers.

Commentaires et suites données

En participant pendant quatre années (2019-2023) aux travaux d'un groupe de travail de normalisation européenne j'ai pris conscience de l'importance des recherches prénormatives et de l'enjeu d'anticiper les futurs travaux normatifs. J'ai également eu la chance de prendre part à des « négociations » au sein du groupe, dans un contexte où la recherche de la clarté et de la rigueur scientifique débat avec la préservation d'intérêts nationaux (niveaux de sécurité historiques) ou sectoriels (manières de formuler la sécurité).

Ces travaux ont permis de rédiger tout le chapitre 4 de la prEN 1991-1-8 qui sera mise à l'enquête en 2024 [57], et l'annexe « ouvrages côtiers » de la nouvelle EN 1990 en cours de révision. Ils commencent à être valorisés dans une communication au congrès ICE Breakwaters [30] (avril 2023, Portsmouth, Royaume-Uni), au cours des Meddays de l'AIPCN (octobre 2023, Sète) [31] et dans le *background document* de la future norme [7].

Pour tenter de résoudre le désaccord sur les périodes de retour de calcul, il conviendra d'évaluer la répartition de la sécurité entre l'action (période de retour des tempêtes) et la « résistance » qui n'est pas encore normalisée. Quels coefficients de sécurité implicites seraient-ils pris en compte par les fabricants de blocs dans l'évaluation de leur résistance hydraulique ? Y aurait-il lieu sinon de revoir la définition du taux de dommage ultime d'une carapace en enrochements ? Ou alors faudrait-il accepter que certaines digues maritimes s'écartent des fiabilités cibles de l'EN 1990 ?

2.2.5 Analyse des coefficients de modèle pour les états-limites des ouvrages portuaires

Peut-on appliquer directement les Eurocodes aux ouvrages en site aquatique ? Pour répondre à cette question, j'ai commencé par formuler une question de recherche en termes de modifications et compléments indispensables à apporter aux Eurocodes, pour une application respectueuse du format de sécurité semi-probabiliste aux états-limites. Les éléments indispensables au dimensionnement des quais et qui n'étaient pas abordés dans la collection des Eurocodes des années 1990 concernaient les actions portuaires, d'une part, certains états-limites géotechniques, d'autre part. Ce programme de travail ne relevait pas totalement de la recherche académique mais d'une expertise applicative utilisant les méthodes de la recherche. En effet il était absolument indispensable de comprendre en profondeur et de penser complètement la méthode de prise en compte de la sécurité pour en faire une application raisonnée, réellement nouvelle, aux différents types d'ouvrages portuaires.

Actions

Les actions non encore couvertes par les Eurocodes étaient celles de l'accostage, y compris de l'accostage accidentel (choc de navire, relevant de la catégorie des actions accidentelles), de l'amarrage, des charges de stockage des marchandises de diverses natures sur les terre-pleins, des descentes de charge des outillages portuaires (grues sur roues, sur rails ou sur plaques d'appui, portiques à conteneurs, engins de parc sur roues) (Photo 12), y compris les effets dus au vent, les efforts dus à la houle, au courant, la prise en compte des niveaux d'eau dans les bassins portuaires (influencés par la marée et les conditions barométriques) et les différences de niveau d'eau avec les nappes dans les terre-pleins.

Avec le format des Eurocodes, toutes ces actions variables devaient logiquement être pondérées par $\gamma_Q = 1,50$. Le problème qui restait à résoudre n'était alors plus que de dire comment en déterminer les valeurs caractéristiques, différenciées le cas échéant selon les situations de projet. La référence statistique de l'EN 1990 à une période de retour cinquantennale pour la valeur caractéristique n'était ni transposable à toutes ces actions (notamment les charges de stockage, vu l'incertitude radicale sur les évolutions des trafics à venir), ni totalement accessible aux projeteurs (notamment l'amarrage et l'accostage, vu la méconnaissance des distributions de probabilités des tractions d'amarrage sur les bollards et des vitesses d'accostage), ni forcément pertinente compte-tenu des différentes approches traditionnelles de détermination des « valeurs de projet ».



Photo 12. Quai « Port 2000 » pour l'accueil de navires porte-conteneurs, Le Havre (Haropa), Seine-Maritime (Photo : Philippe Alès, sous licence Creative Commons)

J'ai exposé brièvement dans la section 1.1.4 le travail mené pour définir les valeurs caractéristiques propres à chacune de ces actions.

Le coefficient partiel de 1,50 a été repris tel quel, avec des exceptions limitées aux actions variables faiblement variables (courant, descentes de charge des outillages une fois les vitesses de vent fixées dans le cadre des situations de projet en service ou hors service) : pour celles-ci j'ai proposé d'élargir le domaine d'emploi du coefficient partiel de 1,35 des actions permanentes. Ce choix, dont je ne contexte pas l'arbitraire, permettait de ne conserver que deux valeurs pour les coefficients partiels sur les actions, 1,35 et 1,50. Il a été accepté par le groupe de travail de normalisation WG 6 pour les actions de la houle, mais avec une justification un peu différente : le niveau de sécurité résultant de 1,50 fois l'effort généré par la houle cinquantennale (selon le format de base des Eurocodes) serait peu éloigné du niveau de sécurité obtenu avec 1,35 fois l'effort généré par la houle centennale (format du WG6). Ce raisonnement est mathématiquement insensé. Mais il est de même nature que la justification de l'approche « 2* » de pondération des soutènements-plan.

Toutefois le coefficient partiel multiplicatif n'était pas adapté au traitement des incertitudes sur les niveaux d'eau. J'ai expliqué en 1.2.2 sur le cas des barrages qui est parfaitement généralisable, le raisonnement qui a conduit à privilégier la détermination directe des niveaux d'eau de calcul par des périodes de retour ou des appréciations expertes, sans passer par l'intermédiaire d'un coefficient γ .

Etats-limites

A cette époque, le calcul « aux états-limites » venait d'être introduit en France pour la justification des fondations superficielles et profondes dans le fascicule 62 titre V, dans le même format de sécurité que celui du BAEL : c'est-à-dire avec les coefficients partiels sur les actions et sur les résistances, et le coefficient partiel de modèle sur l'effet des actions, noté $\gamma_{F3} = 1,125$. En contrepartie de la prise en compte de ce coefficient de modèle, les coefficients « de valeur » sur les actions permanentes était pris égal à $\gamma_G = 1,20$ au lieu de $\gamma_G = 1,35$, et celui sur les actions variables était arrondi à $\gamma_Q = 1,30$ au lieu de $\gamma_Q = 1,50$ (notez la différence de casse sur les indices).

Alors que l'Eurocode 7 était en cours de rédaction, il semblait raisonnable de parier sur une reprise du format du fascicule 62 titre V, alors le plus « avancé » en Europe, ou restant proche de celui-ci, de même que l'Eurocode 2 s'était quelques années auparavant bâti sur un modèle proche de notre BAEL.

Le problème qui restait à résoudre concernait les états-limites des ouvrages de soutènement : glissement, renversement pour les murs-poids ; défaut de butée, défaut de résistance au moment fléchissant dans les parois moulées et rideaux de palplanches, défaut de résistance en traction des tirants d'ancrage, instabilité de Kranz des parois ancrées pour les soutènements-plan. Un degré de complexité supplémentaire était apporté par l'existence de deux grands types de modèles de calcul de ces ouvrages, le calcul élasto-plastique et le calcul à la rupture (Balay, 1984). Donc, pour chacun de ces états-limites, quelles devaient être les valeurs appropriées des coefficients partiels γ_m (sur les propriétés des matériaux) et/ou γ_R (sur les résistances) ?

La travail bibliographique confirmé par les échanges lors du projet PROVERBS avait mis en évidence plusieurs philosophies ou méthodes de calcul des coefficients partiels : (i) la détermination d'ensemble de tous les coefficients partiels, sur les actions comme sur les résistances, de manière à ce que l'indice de fiabilité résultant soit aussi proche que possible d'un indice de fiabilité-cible exogène, identique pour tous les ouvrages d'une même classe de fiabilité (ou classe de conséquences, selon le terme des Eurocodes) : c'était la méthode mise en avant dans PROVERBS et les documents de l'AIPCN sous le leadership de l'université d'Aalborg ; (ii) la détermination au cas par cas, projet par projet, du

dimensionnement optimal par minimisation du coût global sans référence à des indices de fiabilité-cibles : c'était la méthode recommandée dans PROVERBS par l'université de Delft, où l'indice de fiabilité optimal résulte d'un calcul socio-économique.

J'ai mis au point une méthode alternative reposant sur l'hypothèse structurante suivante : même si les niveaux de dimensionnement traditionnels s'écartent des indices de fiabilité-cibles donnés dans l'EN 1990 annexe C, ils révèlent de bons compromis entre la sécurité et l'économie et, partant, ils peuvent se substituer aux indices de fiabilité-cibles dans le calcul des coefficients de sécurité partiels.

Pour mettre cela en œuvre, et probablement influencé par le format du fascicule 62 titre V, j'ai fait le choix de privilégier les coefficients partiels à la source γ_m sur les propriétés des matériaux plutôt que des coefficients partiels γ_R sur les résistances.

Comme les valeurs caractéristiques et les coefficients partiels sur les actions étaient maintenant choisis, comme les coefficients partiels γ_m sur les propriétés géotechniques (résistance au cisaillement, pression limite pressiométrique et résistance de pointe pénétrométrique) étaient donnés dans le fascicule 62 titre V, d'ailleurs proches de ce qui circulait dans les *drafts* de l'EN 1997, il fallait déterminer les valeurs des coefficients de modèle γ_{Rd} de manière à retrouver *in fine* les niveaux de dimensionnement peu éloignés des niveaux « traditionnels ».

J'ai choisi de fusionner les coefficients de modèle d'action et de résistance pour travailler sur des $\gamma_d = \gamma_{Rd} \times \gamma_{sd}$, probablement influencé en cela par le γ_{f3} du fascicule 62 titre V et du BAEL. Pour faciliter le travail comme on va le voir dans ce qui suit, j'ai introduit la notion de « facteur de dimensionnement » (Γ) défini, pour chaque état-limite à vérifier se présentant sous la forme « Sollicitation < Résistance » (mais on peut prolonger sans difficulté aux autres formes d'inégalités, excepté pour l'état-limite de fatigue – qui était en dehors du champ de cette recherche), par :

$$\Gamma = \frac{\text{Résistance}}{\text{Sollicitation}} \quad (36)$$

Dans cette expression la résistance et la sollicitation figurent avec leurs « valeurs de calcul » pondérées de tous les coefficients partiels de valeur et de modèle, prescrits par le code de calcul (ou norme, règlement...). On peut écrire de manière plus parlante, où F désigne les actions :

$$\Gamma = \frac{R\left(\frac{X_k}{\gamma_m}\right)}{\gamma_d \times S(\gamma_f \times F_k)} \quad (37)$$

Quand on raisonne avec des coefficients globaux (on désigne ceux-ci souvent par F , mais comme j'ai employé F juste plus haut pour parler des actions je les noterai exceptionnellement CoG) et des valeurs nominales des résistances et sollicitations, le facteur de dimensionnement s'écrit logiquement :

$$\Gamma = \frac{\text{Résistance nominale}}{CoG \times \text{Sollicitation nominale}} \quad (38)$$

Le sens est le suivant :

- un ouvrage est *justifié* si *tous* les facteurs de dimensionnement correspondant aux vérifications des conditions d'état-limite à effectuer, dans toutes les situations de projet, pour toutes les déclinaisons des combinaisons d'actions, sont supérieurs ou égaux à 1,00 ;

- un ouvrage est *dimensionné* (c'est-à-dire en fait optimisé), quand les facteurs de dimensionnement sont aussi proches que possible de 1,00, tout en restant supérieurs ou égaux à cette valeur ;
- les *états-limites dimensionnants*, et par là les situations de projet et les déclinaisons des combinaisons d'actions dimensionnantes, selon les parties d'ouvrage, sont ceux dont le facteur de dimensionnement est le plus petit.

Ainsi les phases successives ont été définies pour le calcul des coefficients de modèle des états-limites des soutènements-plan en palplanches [22] :

1. Etablissement d'une famille d'ouvrages relativement simples (rideau dans un sol homogène sur tout le massif, ancré sur un contre-rideau arrière par un seul lit de tirants, charge d'exploitation uniformément répartie sur tout le terre-plein horizontal, effort d'amarrage, nappe phréatique dans le sol et variation du niveau d'eau dans le bassin à marée) ; cette famille était paramétrée par : les propriétés du sol, la position de la nappe phréatique, le niveau de mi-marée, les différences de pressions hydrostatiques sur les deux faces du rideau en situations de marée haute et de marée basse, l'intensité de la charge d'exploitation, l'intensité de la traction d'amarrage (Figure 14) ;
2. Construction d'un indice de coût d'ouvrage, établi avec l'aide de maîtres d'ouvrages présents au comité de pilotage du projet (I). Cet indice de coût avait pour seule vocation de faciliter la comparaison entre les dimensionnements, il n'avait donc pas de valeur absolue mais relative et combinait la fourniture (au kg) et la mise en œuvre (au m²) des palplanches principales et des tirants métalliques ;
3. Identification des niveaux de sécurité traditionnels représentés par les coefficients de sécurité globaux pour chacun des états-limites ci-dessus ;
4. Choix d'une méthode de calcul : butée simple avec minoration *a priori* de la butée, butée simple avec majoration *a posteriori* de la fiche, calcul élasto-plastique au module de réaction ;
5. Hypothèse simplificatrice (dans le cadre de cette démarche) que les valeurs caractéristiques des actions et des propriétés des matériaux pour les dimensionnements semi-probabilistes sont les mêmes que les valeurs nominales utilisées dans les dimensionnements traditionnels ;
6. Dimensionnement de chaque ouvrage (i) de la famille avec le niveau de sécurité traditionnel, où l'on détermine (la nuance d'acier étant donnée et la même pour tous) : le module des palplanches principales, la profondeur de fiche, le diamètre et la longueur des tirants (pour simplifier on ne dimensionne pas le contre-rideau). Ces éléments permettent de calculer l'indice de coût traditionnel : $I(T)$ de chaque ouvrage i : $I_i(T)$;
7. Choix des coefficients partiels à la source (hors coefficients de modèle) : $\gamma_{g, sup} = 1,20$ pour les actions permanentes défavorables, $\gamma_{g, inf} = 0,90$ pour les actions permanentes favorables, $\gamma_q = 1,30$ pour les actions variables, $\gamma_c = 1,00$ à $1,50$, $\gamma_{tan(\phi)}$ = 1,00 à 1,20, $\gamma_{fy, palplanches} = 1,10$, $\gamma_{fy, tirants} = 1,10$.
8. Initialisation des coefficients de modèle $\gamma_d = 1,125$ (valeur BAEL et fascicule 62 titre V) pour les états limites de défaut de butée (rideau principal), de défaut de résistance au moment fléchissant (rideau principal), de défaut de résistance en traction des tirants, d'instabilité de Kranz ;
9. Dimensionnement de chaque ouvrage avec le jeu de coefficients de modèle γ_d permettant le calcul d'un indice de coût : $I(d)$ de chaque ouvrage i : $I_i(d)$;
10. Vérification selon les règles traditionnelles (fixées à l'étape 3) de chaque ouvrage i ainsi dimensionné, et calcul, pour chaque état-limite, du facteur de dimensionnement noté $\Gamma_{T, i}(d)$;

11. Ajustement par itérations successives (manuelles) des coefficients de modèle γ_d en revenant à l'étape 8, de manière à résoudre le programme :

$$\forall i, \text{Min}(|I_i(d) - I_i(T)|) \quad (39)$$

$$\forall i, \Gamma_{T,i}(d) \geq 0,90 \quad (40)$$

La contrainte (40) signifie que l'on impose que le coût des ouvrages dimensionnés sous le format semi-probabiliste soit le plus proche possible du coût qui aurait résulté de l'application du format traditionnel aux coefficients globaux.

Imposer que les ouvrages dimensionnés sous le format semi-probabiliste soient entièrement justifiés sous les règles traditionnelles ($\forall i, \Gamma_{T,i}(d) \geq 1,00$) n'aurait en effet pas permis d'effacer convenablement les écarts de coût. A l'inverse l'effacement poussé des écarts de coût aurait conduit à ce que certains ouvrages dimensionnés sous le format semi-probabiliste se révèlent très insécuritaires au regard des règles traditionnelles. La contrainte (40) signifie que l'on tolère que les ouvrages dimensionnés sous le format semi-probabiliste restent « un peu » insécuritaires au regard des règles traditionnelles, dans la limite de 10% : le choix de ce seuil était arbitraire mais transparent.

C'est donc ainsi que s'est construit le compromis entre économie et sécurité.

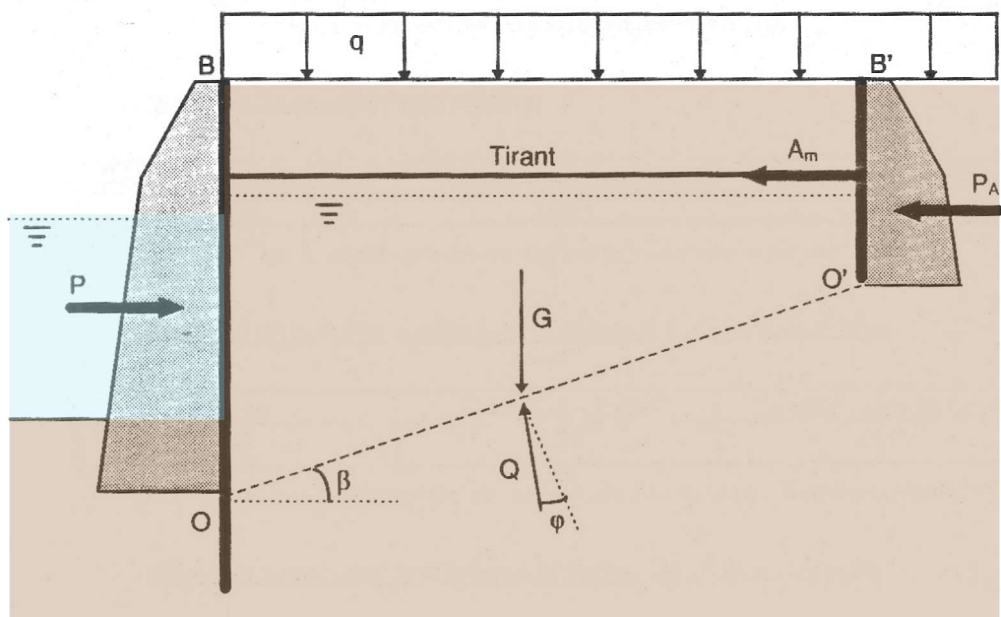


Figure 14. Coupe schématique de l'ouvrage de soutènement étudié pour caler les coefficients de modèle (source : Bonnet & Seidlitz, 1998)

Dans les Figures 15 à 19 qui suivent, l'encadré à droite fait référence au plan d'expérience qui faisait varier respectivement les propriétés du sol (*sol*), la géométrie de l'ouvrage, comme la hauteur libre du rideau et les niveaux d'eau côté bassin et terre-plein (*conf*) et les actions extérieures, comme la charge de stockage sur le terre-plein et l'amarrage (*ch*).

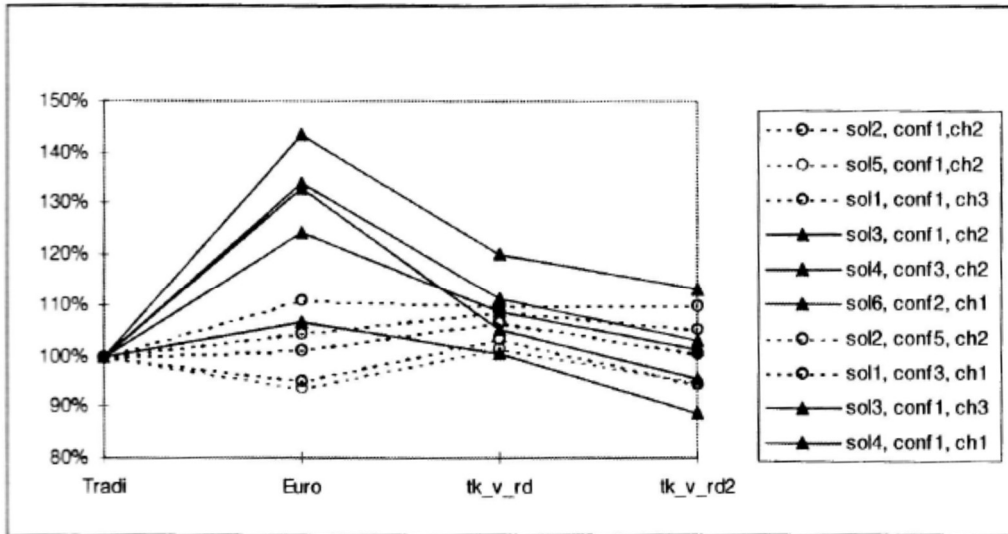


Figure 15. Evolution des coûts des ouvrages de soutènement en palplanches selon les itérations sur les coefficients de modèle, méthode du coefficient de réaction (source : Bonnet & Seidlitz, 1998)

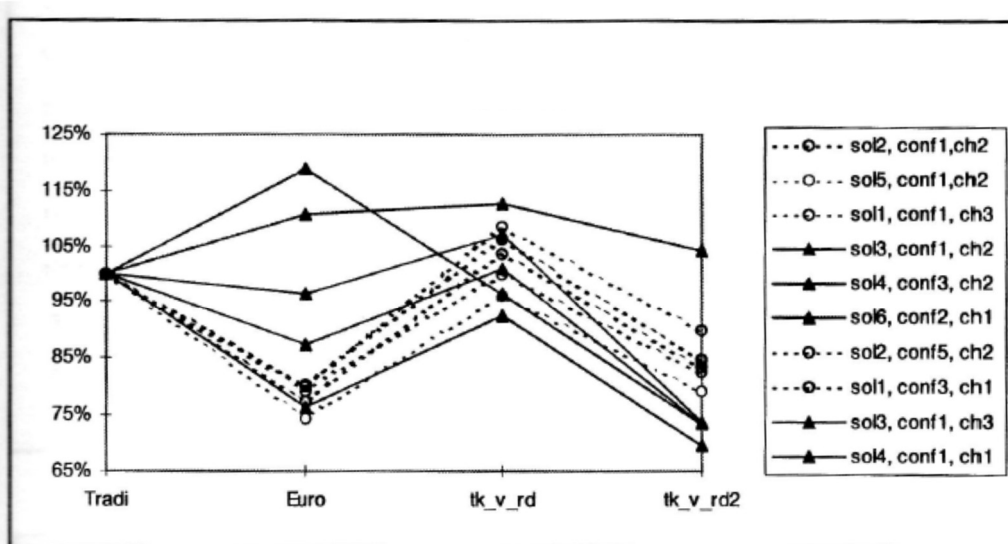


Figure 16. Evolution des fiches des rideaux de palplanches selon les itérations sur les coefficients de modèle, méthode du coefficient de réaction (source : Bonnet & Seidlitz, 1998)

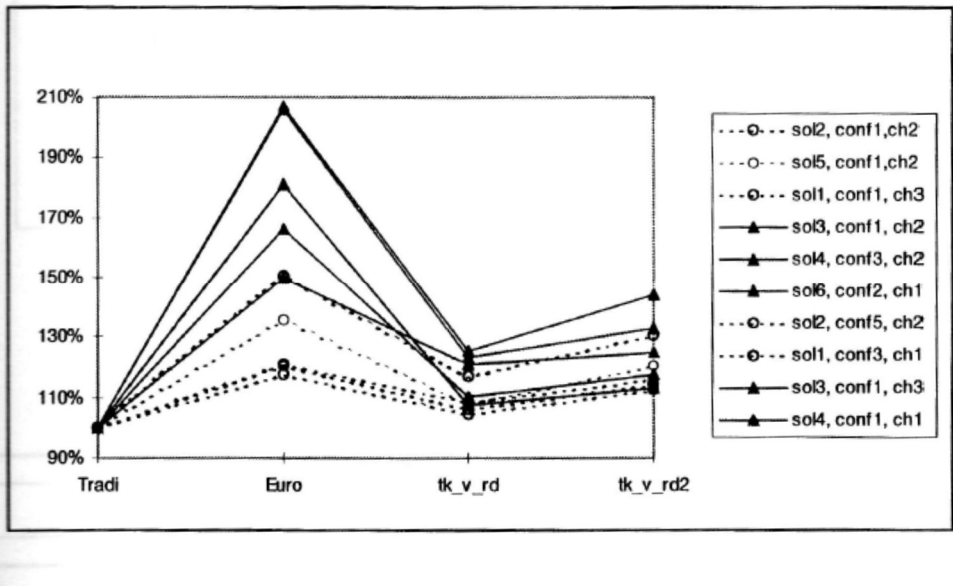


Figure 17. Evolution des types de palplanches (modules) selon les itérations sur les coefficients de modèle, méthode du coefficient de réaction (source : Bonnet & Seidlitz, 1998)

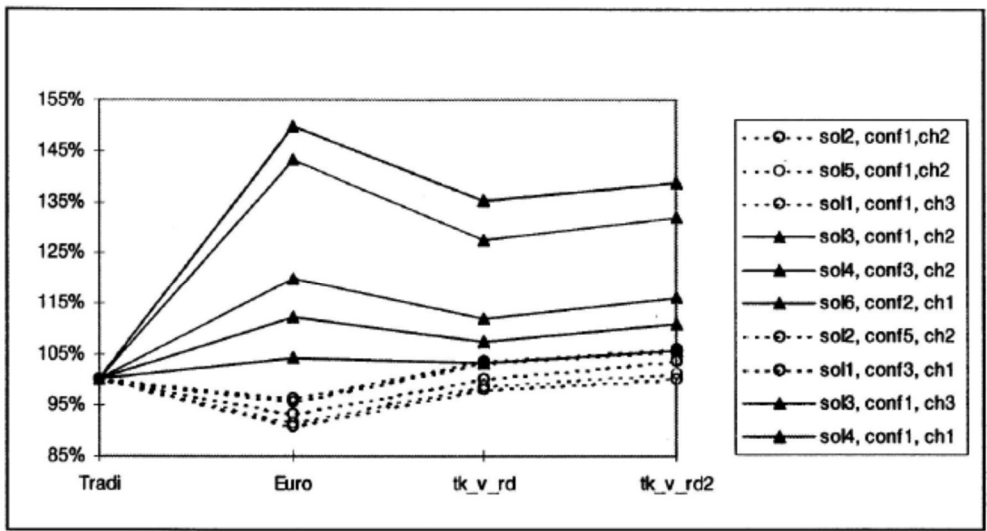


Figure 18. Evolution des diamètres des tirants selon les itérations sur les coefficients de modèle, méthode du coefficient de réaction (source : Bonnet & Seidlitz, 1998)

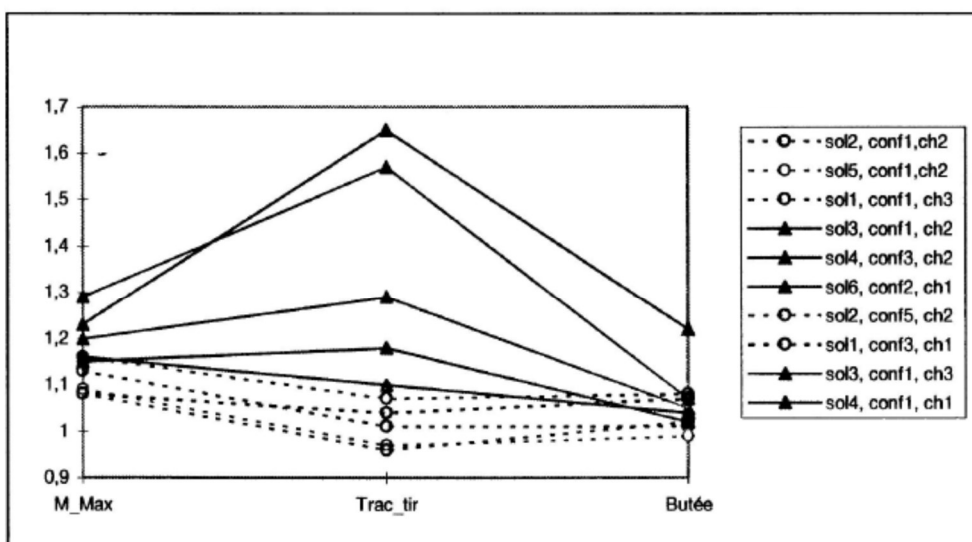


Figure 19. Facteurs de dimensionnement au sens, du niveau de sécurité traditionnel, des ouvrages dimensionnés avec la dernière itération des coefficients de modèle (selon trois états-limites en abscisse), méthode du coefficient de réaction (source : Bonnet & Seidlitz, 1998)

Ce projet a été supervisé sur 6 ans par le comité de pilotage mis en place par le STCPMVN réunissant des membres du RST (LCPC, LRPC) et des maîtres d'œuvre de travaux portuaires tant civils que militaires. Il a fait l'objet de points d'étape réguliers avec la profession (Syntec Ingénierie, FNTP-TRAMAF). Il a fait l'objet de deux stages que j'ai co-encadré (Seidlitz, 1996) et (Bonnet, 1997).

Commentaires et suites données

Ce travail a été valorisé dans l'ouvrage ROSA 2000 [3]. Il a fourni de la matière à plusieurs publications dans des revues [9], [12], [13], [14] et communications dans des congrès [20], [21], [24], [25], [26], [27]. Son application au dimensionnement du quai en Seine n°3 d'Honfleur a été présentée lors d'une *keynote* lors de la conférence nationale de fiabilité des matériaux et des structures à Clermont-Ferrand, JNF'05, à laquelle j'ai été invité.

En revanche l'approche de la sécurité par les coefficients de modèle γ_d que j'avais développée n'a pas été reprise dans les Eurocodes ni dans les normes d'application géotechniques. Celles-ci en France ont fait le choix de fusionner les coefficients de valeur et de modèle au sein des coefficients γ_G , γ_Q et γ_R , en privilégiant l'approche 2 (pondération des résistances). Ces choix ont conduit à une modification du contenu de mes cours. Ils nécessitent encore une actualisation de ROSA 2000, en cours [8].

Le travail sur les valeurs caractéristiques des actions portuaires (accostage, amarrage, stockage des marchandises sur les terre-pleins, descentes de charge des grues et portiques) demeure valable. Il a été perfectionné au fil des années par des échanges divers et les ajustements ont été introduits dans mes cours. Là encore l'actualisation en cours de ROSA 2000 [8] présentera un ensemble cohérent et à jour des Eurocodes.

2.2.6 Analyse des coefficients de modèle pour les états-limites des barrages de navigation

Par la suite j'ai conçu une variante du processus de détermination des coefficients de modèle pour les barrages de navigation (Photo 13). Celle-ci a été mise en œuvre dans le cadre d'un partenariat avec l'ingénierie Coyne et Bellier (devenu Tractebel).



Photo 13. Barrage mobile à clapets de Varennes-sur-Seine, Seine-et-Marne (Photo : thor19, sous licence Creative Commons)

Les barrages de navigation sont constitués de parties fixes (radier, piles, bassin de dissipation, rideaux d'étanchéité) et mobiles (vannes métalliques et équipements électro-mécaniques) avec des interactions complexes eau-structure (actions transitoires, vibrations) et sol-structure (sous-pressions, érosion régressive) selon les débits hydrauliques et les consignes de maintien de la ligne d'eau amont.

Les états-limites étudiés correspondaient à la vérification des fondations superficielles : défaut de capacité portante (évaluée tant avec l'essai pressiométrique qu'avec les essais de laboratoire – méthode de Terzaghi), glissement, soulèvement, érosion régressive, boulangerie, décompression de la fondation, en prenant pour chacun d'eux en compte l'effet des sous-pressions hydrauliques. Les états-limites propres au génie civil et à la vantellerie étaient hors du champ de l'étude, de même que les effets des différentes positions des bouchures mobiles (vannes) et le dimensionnement des organes de manœuvre (avec leurs points de contact sur les parties fixes et mobiles). Les actions sismiques n'étaient pas considérées.

Cette démarche ne relevait pas de la recherche académique à proprement parler mais plutôt d'une expertise applicative.

Le processus était le suivant :

1. Construction d'une famille paramétrée d'une dizaine de barrages : valeurs des propriétés des sols, largeurs de passes et largeurs de piles, niveaux de régulation hydraulique dans les biefs amont et aval (Figure 20) ;

2. Dimensionnement de ces ouvrages sous les règles traditionnelles, indexés par (*i*), et Identification, pour chaque état-limite, de son facteur de dimensionnement selon les règles traditionnelles, noté $\Gamma_i(T)$;
3. Choix des coefficients partiels (coefficients de valeur) cohérents avec ceux de la démarche décrite plus haut au 2.2.5 pour les ouvrages portuaires ;
4. Vérification de ces ouvrages sous les règles semi-probabilistes avec les coefficients partiels ci-dessus et les coefficients de modèle tous pris égaux à $\gamma_d = 1,00$; les facteurs de dimensionnement ainsi calculés sont notés $\Gamma_i(\gamma_d = 1,00)$;
5. Pour chaque ouvrage (*i*), le coefficient de modèle $\gamma_{d,i}$ qui conduirait au même niveau de sécurité vis-à-vis de cet état-limite pour les deux approches (traditionnelle et semi-probabiliste), est donné par :

$$\gamma_{d,i} = \frac{\Gamma_i(\gamma_d=1,00)}{\Gamma_i(T)} \quad (41)$$

6. On obtient ainsi pour chaque état-limite étudié une ensemble d'une dizaine de ($\gamma_{d,i}$). On retient une valeur prudente pour être le coefficient de modèle afférent à l'état-limite considéré, avec l'heuristique courante : moyenne plus un écart-type (Tableau 9) ;
7. Test final sur trois barrages existants (barrage de Diama sur le fleuve Sénégal, barrages de Montmeuse et de Saint-Albin en France) : les facteurs de dimensionnement exhibés par ces ouvrages restent proches selon qu'on les calcule avec les règles traditionnelles ou avec le format semi-probabiliste issu de l'étape précédente.

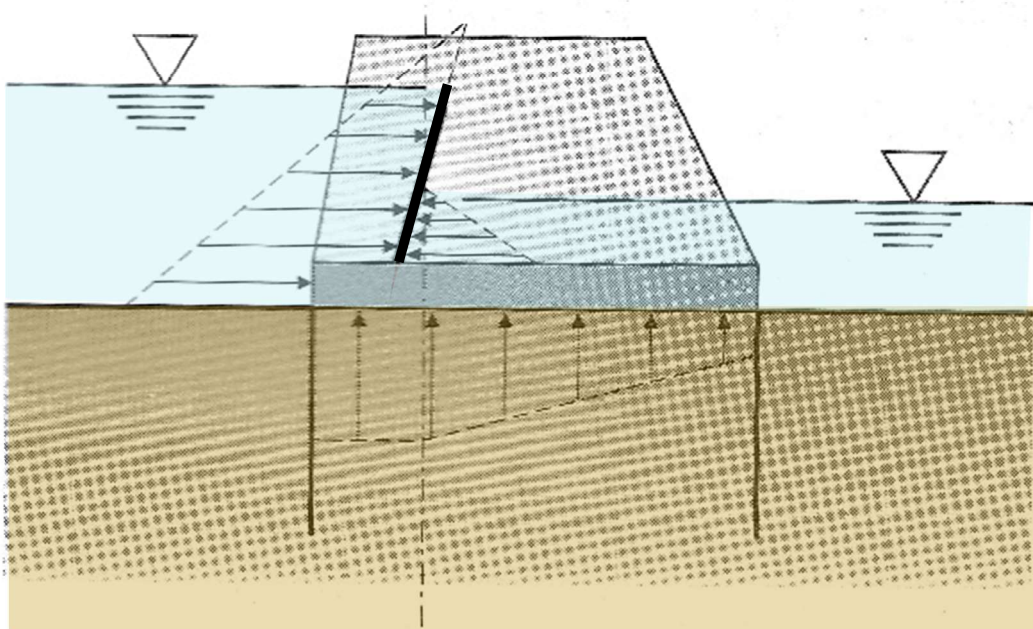


Figure 20. Coupe schématique d'un barrage mobile (source : [1])

Cinq situations durables ou transitoires étaient définies : (i) sous le débit minimal de régulation (perte de charge maximale apportée par l'organe de bouchure) ; (ii) sous le débit maximal de régulation (effacement de la bouchure) ; (iii) sous le débit qui maximise l'effort hydraulique sur la bouchure ; (iv) hors régulation, sous un débit caractéristique ; (v) barrage batardé (maintenance).

Cinq situations accidentelles étaient considérées : (i) sous un débit accidentel ou extrême ; (ii) sous un débit caractéristique, une bouchure restant accidentellement fermée ; (iii) abaissement du niveau aval comme suite à une rupture de l'ouvrage aval ; (iv) choc de bateau sous un débit fréquent ; (v) séisme sous un débit quasi-permanent.

Configurations	Glissement			Capacité portante (pressiomètre)			Capacité portante (Terzaghi)		
	G1	γ_{sd}	Inclinaison(°)	G1	γ_{sd}	Inclinaison(°)	G1	γ_{sd}	Inclinaison(°)
1	1.21	1.12	26.8	1.81	2.04	26.8	1.84	1.17	26.8
2(pile)	2.65	1.13	19	8.77	2.03	12.8	11.17	1.28	19
2(radier)	5.73	1.16	9.5	19.4	1.93	5.6	33.11	1.32	5.6
3	20.79	1.22	1	1.63	1.62	0.6	1.49	1.52	0.6
4	1.32	1.06	19	1.44	2.09	19	1	1.01	19
5	2.03	1.08	12.3	1.02	1.96	8.5	1.43	1.25	12.3
6	29.57	0.96	1	4.91	1.62	0.5	6.77	1.21	0.5
7	1.5	1.02	18.4	0.87	1.94	18.4	0.77	1.88	18.4
8	1.69	1.01	26.4	1.51	1.67	26.4	1.43	1.74	9.5
9	4.27	1.15	8.3	3.18	1.8	5.1	2.96	1.69	5.1
10	1.92	0.98	14.4	2.4	1.85	7.9	3.78	1.07	14.4
Moyenne M	6.61	1.09		4.27	1.89		5.98	1.45	
Ecart-Type E	8.66	0.08		5.04	0.16		8.70	0.25	
M + 1'E		1.17			2.05			1.70	
Configurations	Soulèvement		Erosion Régressive		Boulance		surface comprimée		Inclinaison ELS (°)
	G1	γ_{sd}	G1	γ_{sd}	G1	γ_{sd}	ELS	ELU	
1	1.73	0.95	1.36	1	10.79	1	100%	100%	23.9
2(pile)	1.73	0.96	2.86	1	23.83	1	100%	100%	16.1
2(radier)	1.73	0.97	2.86	1	23.83	1	100%	100%	8.3
3	1.73	0.92	4.68	1	39	1	100%	100%	0.9
4	1.73	0.94	1.13	1	8.97	1	100%	100%	16.2
5	1.73	0.92	1.41	1	11.15	1	100%	100%	10.7
6	1.73	0.94	6.4	1	53.33	1	100%	100%	0.7
7	1.73	0.91	5.1	0.56	42.55	0.56	88%	73%	15
8	1.73	0.9	1.19	1	9.88	1	100%	100%	16.7
9	1.73	0.96	4.46	1	37.17	1	100%	100%	7
10	1.73	0.91	1.78	1	14.83	1	100%	100%	11.4
Moyenne M	1.73	0.93	3.02	0.96	25.03	0.96	99%	98%	6.72
Ecart-Type E	0.00	0.02	1.69	0.12	14.26	0.12	3%	7%	13.44
M + 1'E		0.96		1.08		1.08			

Tableau 9. Coefficients de modèle pour les états-limites des barrages de navigation (source : Coyne et Bellier, 1997)

Ce travail a été valorisé dans le Guide du chef de projet barrages [1] dont il constitue la base de l'annexe 2. Il a également servi à l'étude des barrages de retenue [5], [6], [16], [17].

2.2.7 Etude probabiliste du coefficient de modèle pour l'état-limite de défaut de capacité portante d'un pieu isolé sous charge axiale

J'ai mené en 2004-2005 un travail de recherche spécifique avec R. Frank sur les niveaux de sécurité afférents à l'état-limite de défaut de capacité portante des pieux isolés chargés verticalement en tête, dans le cadre de l'extension d'une comparaison qu'il avait effectuée en 1997 à l'époque de la prénorme ENV 1997-1. Il s'agissait maintenant d'étalonner les raccordements nationaux à la norme EN 1997-1 nouvellement finalisée par le CEN. Quelle valeur proposer dans la future norme nationale pour le coefficient de modèle de cet état-limite, de sorte que les utilisateurs retrouvent les niveaux de dimensionnement aussi proches que possible de ceux qui auraient été issus de l'application du fascicule 62 titre V, qui constituait la référence technique et économique en France ?

La question de recherche était de savoir comment la connaissance d'une base de données d'essais de pieux pouvait permettre à un calcul probabiliste, à identifier et à mettre en œuvre, de donner une

valeur du coefficient de modèle pour la résistance axiale des pieux (Photo 14), dans la suite de (Frank, 1997) et (Bauduin, 2003).

La valeur caractéristique de la capacité portante sous charge axiale d'un pieu qui n'a pas encore été mis en place dans un sol donné peut être déterminée de plusieurs manières (Bustamante et *al.*, 1981) : en exploitant une série d'*essais de chargement statiques* de pieux déjà mis en place dans le sol en question avec application d'une formule statistique faisant intervenir un facteur ξ sur la moyenne ou la valeur la plus basse, tabulé en fonction du nombre d'essais dont on dispose ; ou en faisant des calculs à partir des propriétés de ce sol que l'on a appréciées en exploitant des essais de caractérisation mécanique des différentes couches traversées. Dans le deuxième cas, il y a deux possibilités : dans la *méthode des pieux modèles* on calcule une valeur de la capacité portante pour chaque profil de sondage du sol à partir des propriétés mesurées, et la valeur caractéristique découle d'une formule statistique sur les différentes capacités portantes calculées faisant intervenir un facteur ξ comme dans la méthode des essais de chargement ; la *méthode alternative ou directe* consiste à déterminer d'abord les valeurs caractéristiques des propriétés de chaque couche de sol, et à calculer ensuite la valeur (caractéristique) de la capacité portante du pieu (il n'y a plus besoin d'utiliser un facteur ξ car on a pris en compte la dispersion des propriétés du sol au moment de choisir des valeurs caractéristiques sécuritaires dans chaque couche de sol).



Photo 14. Pieux supportant la dalle du 3^e Quai en Seine du port d'Honfleur (Haropa), Calvados (Photo : EMCC)

Trois phases ont rythmé cette démarche : (i) comparaison brute des niveaux de sécurité issus de l'approche 1 et de l'approche 2 de l'EN 1997-1 (l'approche 3 n'était pas applicable) avec ceux issus du fascicule 62 titre V pour les deux combinaisons types utilisées pour vérifier les ELU (fondamentale et accidentelle) ; (ii) calcul de la valeur du coefficient de modèle γ_{Rd} qui permette que le calcul Eurocodes conduise aux dimensionnements du fascicule 62 titre V ; (iii) calage probabiliste du coefficient de

modèle γ_{Rd} , alternatif au précédent, pour tenir compte de l'erreur de modèle en exploitant une base de données de comparaison entre des capacités portantes calculées et mesurées. Partout nous avons considéré la capacité portante totale sans la décomposer les contributions de la résistance de la base et du frottement sur le fût. Je me suis personnellement investi plus particulièrement dans les phases (ii) et (iii).

La résistance axiale du pieu est notée R_c . Le coefficient partiel de résistance qui lui est appliqué est noté γ_t . Le coefficient partiel sur les actions est noté γ_F : c'est un coefficient composite variant – pour la combinaison fondamentale – entre 1,35 et 1,50, qui résulte d'une proportion (plusieurs hypothèses ont été faites) entre les charges permanentes pondérées par 1,35 et les charges variables pondérées par 1,50.

Comparaison des niveaux de sécurité France (fascicule 62 titre V) et Eurocode

Le choix a été fait de représenter le niveau de sécurité global par un facteur composite global de sécurité FS défini de la manière suivante :

- Méthode des essais de chargement statique : niveau de sécurité par rapport à des R_c mesurés

$$FS = \gamma_F \times \gamma_t \times \xi \quad (42)$$

- Méthode alternative ou directe : niveau de sécurité par rapport à des R_c calculés

$$FS' = \gamma_F \times \gamma_t \quad (43)$$

Cette comparaison n'a pas été faite pour les pieux modèle en l'absence de dispositions comparables dans le fascicule 62 titre V.

Les valeurs de FS et FS' ont été calculées avec les trois règles de pondération identifiées (deux règles d'Eurocodes, une règle française) sur les valeurs des coefficients partiels de la combinaison type fondamentale et de la combinaison type accidentelle, sur une quinzaine de configurations de pieux où, en utilisant des données des études de dimensionnement du pont Vasco de Gama sur le Tage, l'on a combiné :

- les différentes natures de pieux : foré, battu, à la tarière continue ;
- le nombre d'essais de chargement : de 1 à 4 ;
- le pourcentage des charges permanentes et variables : 100% G, 67% G - 34% Q, 50% G - 50% Q).

Il est apparu nettement que le niveau de dimensionnement français était plus exigeant que le niveau de dimensionnement européen, justifiant d'introduire un supplément de sécurité dans les calculs par l'intermédiaire d'un coefficient de modèle de résistance γ_{Rd} .

Valeur du coefficient de modèle de résistance ajusté sur le Fascicule 62 Titre V

Le coefficient γ_{Rd} calé avec cette méthode est plus un coefficient d'opportunité qu'un réel coefficient de modèle.

La formule est assez simple :

$$\gamma_{Rd} = \frac{FS_{62-V}}{FS_{EC7}} \quad (44)$$

où FS_{62-V} est le facteur global composite tiré des règles du fascicule 62 titre V et FS_{EC7} est le facteur global composite tiré de l'Eurocode 7.

Mais elle donne autant de valeurs numériques que de cas de calcul. Avec les cas explorés dans la première partie on arrive à des fourchettes assez larges allant de 1,10 à 1,30 pour la combinaison fondamentale, et de 1,00 à 1,25 pour la combinaison accidentelle (valeurs arrondies « à l'œil »). Ces valeurs dépendent largement du nombre d'essais (c'est l'effet du facteur ξ).

Le travail ne va pas plus loin et ne choisit pas entre les valeurs. Arrivé à ce stade, le scientifique doit céder la main au « politique ».

Calage probabiliste du coefficient de modèle de résistance pour la combinaison fondamentale (valeur de calcul)

Le coefficient γ_{rd} calé avec cette méthode est cette fois un coefficient de modèle au sens original du terme.

Des variables aléatoires prennent en compte différentes incertitudes sur la résistance axiale du pieu :

$$\widehat{R}_c = R_0 \times \hat{p} \times \hat{\eta} \quad (45)$$

où :

- \hat{p} modélise la variabilité des propriétés spatiales du sol, en l'occurrence les variations aléatoires de la pression limite pressiométrique dans le sol le long du pieu ; on choisit une loi lognormale avec une espérance de 1,00, un coefficient de variation de 30% à 50% et un facteur de réduction de variance de $\sqrt{5}$ à $\sqrt{10}$;
- R_0 est la valeur moyenne de la capacité portante, permettant de centrer \hat{p} comme ci-dessus ;
- $\hat{\eta}$ modélise l'incertitude de modèle, en l'occurrence les variations aléatoires du rapport entre la capacité portante calculée avec les propriétés du sol et la capacité portante mesurée par des essais de chargement ; on choisit une loi lognormale dont les moments sont estimés à partir d'une base de données de 42 essais de pieux ;

L'incertitude d'échantillonnage dû au nombre limité d'essais de pieux dans la base de données est prise en compte par une augmentation de la variance de la loi de $\hat{\eta}$ (estimateur bayésien). L'acceptabilité de l'hypothèse lognormale de $\hat{\eta}$ est vérifiée par le test du Khi-deux au niveau de signification de 90%.

Comme le produit de deux lois lognormales est une loi lognormale, \widehat{R}_c suit une loi lognormale, dont l'espérance et l'écart-type de la loi normale associée sont désignés par μ'_{Rc} et σ'_{Rc} .

Le processus consiste à déterminer d'abord la valeur caractéristique par référence à un fractile (ou probabilité de dépassement dans le sens défavorable) de la loi de \widehat{R}_c , puis la valeur de calcul par référence à un fractile plus sévère, à en déduire le coefficient partiel de résistance et enfin le coefficient de modèle. Avec les expressions simplifiées pour les fractiles des lois lognormales :

$$R_{c,k} = R_0 e^{(\mu'_{Rc} + u_k \times \sigma'_{Rc})} \quad (46)$$

$$R_{c,d} = R_0 e^{(\mu'_{Rc} + u_d \times \sigma'_{Rc})} \quad (47)$$

$$\gamma_R = \frac{R_{c,k}}{R_{c,d}} \quad (48)$$

$$\gamma_{Rd} = \frac{\gamma_R}{\gamma_t} \quad (49)$$

où :

- u_k est le fractile de la loi normale correspondant à la probabilité de dépassement dans le sens défavorable d'une valeur caractéristique de résistance (p_k), c'est-à-dire 0 (quand la valeur caractéristique est la valeur moyenne) ou -1,64 (pour $p_k = 5\%$) ; on a en effet $u_k = \Phi(p_k)$ où Φ est la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite ;
- u_d est le fractile de la loi normale correspondant à la probabilité de dépassement dans le sens défavorable de la valeur de calcul de la résistance (p_d), cf. la discussion qui suit relativement à l'appréciation de cette probabilité de dépassement ;
- $\gamma_t = 1,10$ est le coefficient partiel des Eurocodes pour la résistance axiale du pieu.

La première approche pour apprécier u_d met en œuvre la « méthode des valeurs de calcul » telle qu'indiquée dans l'annexe C de l'EN 1990 :

$$u_d = \alpha_R \times \beta_0 \quad (50)$$

où :

- α_R est le facteur d'influence d'une variable de résistance, donnée par l'EN 1990 égal à -0,8 ;
- β_0 est l'indice de fiabilité cible pour les ELU, donné par l'EN 1990 égal à 3,8.

Cette méthode conduit à $p_d = 1,18 \cdot 10^{-3}$. Cette valeur est jugée conduire à des coefficients partiels trop élevés par rapport à la pratique géotechnique usuelle. Aussi la deuxième approche consiste-t-elle à révéler un nouvel indice de fiabilité β_0 sous-jacent à l'emploi des coefficients de sécurité de l'EN 1997 ou du fascicule 62 titre V.

La formule de calcul inverse de l'indice de fiabilité d'un état-limite de la forme « Effet des actions (E) < Résistance (R) » avec des lois lognormales est :

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{\mu_R}{\mu_E}\right) + 0,5 \ln(1+V_E^2)(1+V_R^2)}{\sqrt{\ln(1+V_E^2)(1+V_R^2)}} \quad (51)$$

où :

- V_E est le coefficient de variation de l'effet des actions, pris égal à 0,20 ;
- V_R est le coefficient de variation de la résistance, calculé avec le modèle utilisé ;
- $\frac{\mu_R}{\mu_E}$ est le rapport des espérances des résistances et des effets des actions d'un pieu dimensionné avec les Eurocodes ; la valeur de ce rapport peut être reconstitué par la multiplication suivante :

$$\frac{\mu_R}{\mu_E} = \frac{\mu_R}{R_k} \times \frac{R_k}{R_d} \times \frac{E_d}{E_k} \times \frac{E_k}{\mu_E} \quad (52)$$

C'est-à-dire ; 1,05 (est.) x 1,10 ou 1,40 (γ_t de l'EN 1997 ou du fascicule 62 titre V) x 1,425 (50% G – 50% Q) x 1,15 (est.)

En combinant les hypothèses sur le coefficient de variation de la résistance et sur le choix de la valeur caractéristique, ce calcul donne un indice de fiabilité sous-jacent relativement faible, un peu supérieur à 2 pour l'EN 1997 et un peu inférieur à 3 pour le fascicule 62 titre V. Au final en choisissant un indice de fiabilité de 3,0, on arrive aux propositions du Tableau 10.

	Valeur caractéristique de la résistance = valeur moyenne	Valeur caractéristique de la résistance = fractile à 5 %
$\gamma_{R, \text{calé}}$	1,739 à 1,965	1,393 à 1,47
γ_t	1,40 (Fascicule 62-V) 1,10 (EN 1997-1, approche 2)	
$\gamma_{Rd, \text{calé}}$	1,242 à 1,404 (Fasc. 62-V) 1,581 à 1,786 (EN 1997-1, appr. 2)	0,995 à 1,05 (Fasc. 62-V) 1,266 à 1,336 (EN 1997-1, appr. 2)

Tableau 10. Proposition de coefficient de modèle de résistance pour ajuster à $\beta = 3,0$ les niveaux de sécurité de l'EN 1997-1 dans les combinaisons fondamentales, prenant en compte l'information supplémentaire sur l'erreur de modèle des essais de sol, pour la résistance en capacité portante d'un pieu chargé verticalement (source : [15])

La formule rigoureuse pour la valeur caractéristique ou la valeur de calcul de la résistance R_c prenant en compte l'incertitude d'échantillonnage est donnée en annexe à la publication [15].

Commentaires et suites données

Cette recherche a permis d'éclairer les travaux méthodologiques de la commission de normalisation française en charge de la rédaction de la norme NF P 94 262 « Fondations profondes » [51], qui a intégré des coefficients de modèle de résistance et leur a affecté au final des valeurs recueillant le consensus des parties prenantes.

Cette expérience de travail collaboratif avec R. Frank a contribué à développer mon esprit critique sur les manières de prendre en compte les différentes incertitudes ainsi que sur les limites des modèles. Il m'a montré que les calculs relevant de différentes approches de la sécurité avaient d'autant plus d'impact sur la communauté scientifique qu'ils étaient rigoureusement présentés, et que cette étape préalable restait indispensable avant de pouvoir nourrir une discussion normative – au cours de laquelle les mathématiques s'effacent devant l'expertise de haut niveau. Mon emploi du temps ne m'a malheureusement pas permis de continuer à suivre ces travaux normatifs, mais je reste fier d'avoir apporté une pierre à cette construction.

2.3. Encadrement d'équipe et activités scientifiques

2.3.1 Recherche et management

Je recense trois expériences personnelles de management/animation d'équipes réunies pour réaliser un projet ayant une composante de recherche forte sinon majoritaire : celle sur les gabions de palplanches (groupe-projet de 6 personnes, avec le STCPMVN, Arbed, ENPC/CERCOS et le Bureau Veritas) ; celle sur l'application des Eurocodes aux ouvrages en site aquatique (comité de pilotage de 20 personnes, avec les ports autonomes de Dunkerque, du Havre, de Nantes, de Bordeaux, de Marseille, le service d'infrastructure de Défense ; et comité scientifique et de rédaction avec Fondasol, le laboratoire national d'hydraulique d'EDF, le LRPC de Melun, le LCPC, Sogreah, ISL Ingénierie, Simecsol) ; celle sur les barrages de navigation (équipe de 11 personnes, avec le STCPMVN, Coyne et

Bellier, Sogreah, la Compagnie nationale du Rhône, le Service de navigation de la Seine, le Service de navigation du Nord-Est, le Service de navigation Rhône-Saône).

Ces équipes étaient multidisciplinaires : essais de laboratoire / calcul numérique (gabions de palplanches), actions / comportement des structures et des sols (application des Eurocodes), hydraulique / mécanique / géotechnique / résistance des matériaux (barrages de navigation). Les sciences humaines et sociales n'étaient pas représentées (mon expérience SHS est à trouver dans le travail sur la prise en compte des risques et incertitudes dans le calcul socio-économique des investissements publics).

Je crois avoir déjà fortement illustré la complexité de ces projets. J'en relèverai en synthèse trois aspects qui ont accompagné tout mon parcours scientifique : que l'état de l'art dans la prise en compte de l'incertain soit dispersé ; que les bases du format des Eurocodes (EN 1990) n'aient été ni stabilisées au début de mes travaux, ni ensuite totalement adaptées aux ouvrages en site aquatique, et en tout cas très (trop) rarement comprises par la communauté scientifique ; enfin que la mise en œuvre du format de sécurité impliquait d'avancer sur les « deux jambes » : valeurs caractéristiques et valeurs de calcul (ou coefficients de sécurité partiels, qui sont les rapports entre les valeurs caractéristiques et les valeurs de calcul).

Aujourd'hui (2023), les modèles de prise en compte de l'incertain sont, à mon sens, bien mieux compris et utilisés : les bases de la théorie de la fiabilité ont été efficacement diffusées auprès des professionnels par (Calgaro, 2016) et sont enseignées en M2 (c'était déjà le cas à l'université de Paris-Est Marne-la-Vallée, devenue université Gustave Eiffel, avant que je n'arrive à l'IFSA). Travailler avec les probabilités de ruine et les périodes de retour n'est plus un obstacle. Les autres modélisations de l'incertain, par exemple par les sous-ensembles flous [44], ne sont pas utilisées, mais il se peut que ce formalisme soit intéressant pour conceptualiser la prise en compte des « incertitudes radicales » (cf. section 3.2). Le format des Eurocodes est stabilisé, heureusement, ce qui ne veut pas dire qu'il soit totalement maîtrisé notamment dans les domaines non couverts à l'origine (ouvrages côtiers, tunnels, barrages, chaussées). Quant au couple (valeur caractéristique, valeur de calcul), il est à la base de la différenciation de la sécurité selon les degrés de gravité des états-limites, et il est important de bien le faire comprendre ; dans l'approche semi-probabiliste, caler les niveaux de sécurité signifie caler les deux éléments du couple.

J'ai participé activement au recrutement de prestataires dans le cadre de projets ciblés : je citerai par exemple Coyne et Bellier et la Compagnie nationale du Rhône pour les états-limites des barrages, Sogreah (devenu Artelia) et le LNH sur les actions de la houle et les surcotes/décotes du niveau marin, Fondasol et Simecsol pour les modèles de calcul géotechnique, ISL Ingénierie sur le dimensionnement des organes de manœuvre des vannes de barrage et portes d'écluse.

J'ai noué des relations avec des universités et écoles d'ingénieurs pour recruter des stagiaires et en diversifier les profils (annexe C). En tout je compte 13 stagiaires, encadrés et co-encadrés sur une période de 5 ans, venant de 3 universités différentes, 3 écoles d'ingénieurs, 2 INSA, et du CNAM.

En sus des stages que j'ai encadrés ou co-encadrés, j'ai côtoyé de près plusieurs doctorants qui travaillaient sur des sujets de même nature que les miens et dont j'ai pris les résultats en compte dans mes propres travaux : thèse d'A. Corfdir (1997) sur les gabions de palplanches (dans le cadre du projet décrit au 2.2.1), de L Delattre (1999) sur le dimensionnement des écrans de soutènement (dans le

cadre du projet décrit au 2.2.5), d'A. Kortenhaus (2003) sur les méthodes probabilistes de dimensionnement des digues (dans le cadre du projet décrit au 2.2.3), d'O. Peyras sur la sécurité des barrages de retenue (dans le cadre du projet décrit au 2.2.6), de F. Mazas (2017) sur les corrélations entre paramètres météocéaniques (dans le cadre du projet décrit au 2.2.4).

Mes participations à quelques jurys de thèse ont été très enrichissantes. J'y ai vu la valeur ajoutée de la confrontation des idées et des points de vue entre le candidat et les membres du jury, ainsi qu'entre les membres du jury. J'ai apprécié le soin apporté à la présentation et à la rigueur dans l'expression écrite et orale.

C'est dans l'autre versant de ma carrière que j'ai pratiqué intensément le management, tant à la DDE de la Manche qu'au Port autonome de Rouen, et aussi dans mes deux postes de sous-directeur en administration centrale. Je souligne que la position de vice-président à l'université Gustave Eiffel m'a conduit à exercer de réelles responsabilités de management d'équipe, dans une posture politique aussi bien que fonctionnelle (c'est une particularité de l'université Gustave Eiffel en raison de sa double mission historique d'université et d'organisme de recherche, à laquelle elle est très attachée). Cette position comprend tous les aspects de l'encadrement : organisation du travail, entretiens d'évaluation annuels, notations et attribution des primes, entretiens de formation, préparation des avancements, etc.

J'ai mis mon expérience managériale au service de mes responsabilités de direction du campus de Versailles. Dans ce contexte je dirais qu'outre la représentation locale de la présidence de l'université sur toutes ses fonctions y compris ressources humaines, le management consiste avant tout à donner des impulsions appropriées aux composantes de recherche pour les encourager dans des partenariats structurants sur les thématiques d'excellence du site, et à nouer des relations de toute sorte avec les partenaires du site, tant publics que privés, tant relevant de l'ESR que des activités économiques et sociales, bien sûr sans forcer la liberté académique. La direction de campus comporte aussi une part substantielle de relations avec les collectivités territoriales et les acteurs de l'aménagement du territoire : la mise en contact des besoins du territoire tels que remontés par les élus ou leurs services avec les capacités de production, synthèse et restitution des connaissances par les composantes de recherche – voire de conseil sur des questions à fort contenu technologique ou impliquant les sciences humaines (sociologie, psychologie, économie, géographie) – participe à mon sens de l'expérience « recherche et management ».

2.3.2 Gouvernance scientifique

Mon arrivée à l'Ifsttar en 2015 puis à l'université Gustave Eiffel après la fusion en 2020 des missions et des structures juridiques de cet organisme de recherche et de l'université de Marne-la Vallée m'a donné de nombreuses occasions d'exercer des responsabilités dans la « gouvernance (ou pilotage) scientifique » d'instances de natures variées, dont je retiendrai ici celles qui m'ont le plus marqué :

- IRT et ITE : administrateur – ou autre appellation équivalente – de Vedecom, Railenium et Efficacy ;
- organismes du RST : administrateur du LCPC (avant 2011), présidence du conseil scientifique du CETu, participation à deux commissions d'évaluation des axes de la stratégie scientifique du CETu (dont une présidence de commission) ;

- conférences internationales : présidence du conseil scientifique de SmartRivers2019, RIM2022 puis RIM2024 ;
- animation scientifique interne : présidence du comité de pilotage des quatre Projets Fédérateurs de l'Ifsttar (Ville 2050, Mobilité et transition numérique, Infrastructures de transition énergétique, Homme virtuel).

Je retiens plusieurs enseignements de ces expériences.

D'abord l'importance de la communication. On ne le sait jamais aussi bien qu'en l'ayant vécu. Comment adapter sa communication aux interlocuteurs que l'on a en face de soi ? J'ai appris à ne pas développer les problématiques de recherche quand je m'exprime dans un conseil d'administration mais à énoncer les mots-clés qui guideront l'exécutif de la structure. J'ai appris à m'abstenir de délivrer des orientations de politique scientifique générale devant les collègues impliqués dans les projets fédérateurs mais à les questionner sur leurs méthodes scientifiques, à leur faire dire ce qui était implicite ou voilé. J'ai appris à renoncer à discuter finement de tous les sujets traités dans une conférence mais à faire émerger des synthèses au sein d'un comité scientifique, en vue des interventions que j'aurais à donner en introduction ou en clôture de la conférence.

Ensuite que les personnes sont en demande d'un regard bienveillant et exigeant (ce devrait être un pléonasme) sur leurs travaux. Je vois dans ces *challenges* une valeur ajoutée des réunions des *boards* des IRT/ITE, et de conseils scientifiques comme celui du CETu (cela rejoint aussi l'expérience brève que j'ai eue en étant membre pendant deux ans du conseil scientifique du SETRA, dans un contexte difficile avant son déplacement en Seine-et-Marne, peu propice au suivi scientifique de fond).

Par ailleurs et contrairement à ce qui est peut-être une idée reçue, il n'est pas forcément nécessaire d'avoir une connaissance préalable du sujet présenté (la familiarité avec l'environnement général du sujet étant quand même préférable...) pour intervenir, de manière pertinente ou non : j'ai pu constater en effet (projets fédérateurs, CETu) que les sujets scientifiques faisaient parfois des sauts étonnants en rebondissant sur des questions paraissant à première vue naïves, étranges ou décalées. Un regard extérieur, décentré, contribue au progrès commun quand il est invité à se porter sur des sujets éloignés de son expertise scientifique propre, dans les instances de gouvernance ou pilotage de la recherche. La candeur qu'il exprime, le témoignage disciplinaire exogène qu'il apporte, tout cela forme un terrain favorable à des fulgurances sérendipitaires (même si celles-ci restent quand même rares !).

Enfin il y a des résistances à s'éloigner de sa « zone de confort ». Les instances de gouvernance des IRT/ITE conjuguent de leur mieux la réactivité de l'actualité et les paris stratégiques de long terme, mais leurs orientations thématiques et applicatives mettent du temps à se concrétiser dans le montage de nouveaux projets de recherche collaborative avec des partenaires encore inconnus, ou dans le lancement de sujets de thèse dont on n'est pas familier. Les thématiques incitatives des colloques et conférences évoluent-elles vraiment d'une édition à l'autre pour s'adapter aux nouveaux enjeux ? J'ai fait partie de la commission constituée en 2016 pour évaluer l'axe 5 de la stratégie scientifique du CETu « *Maîtriser les risques techniques et économiques liées à la construction* », et j'ai présidé en 2018 la commission d'évaluation de l'axe 6 « *Analyser et maîtriser les risques en exploitation* » : j'ai constaté moi-même combien il était nécessaire de rappeler la nécessité du ressourcement scientifique, sans se lasser, et d'inciter à convoquer d'autres disciplines pour renouveler le regard que l'on a sur son sujet (dans le cas présent, il s'agissait d'aborder les aspects sociétaux des risques, les facteurs

organisationnels et humains, et de croiser les approches de la sécurité fonctionnelle et de la sécurité prescriptive).

2.4. Questionnements éthiques dans la conduite et la valorisation des travaux scientifiques

J'analyse ici mon expérience des questionnements éthiques en me référant à la « Charte française de déontologie des métiers de la recherche » (2015). J'ai été confronté à quelques sujets éthiques que je décris plus bas. Mon expérience ne m'a pas mis en prise avec d'autres sujets : je n'ai pas été confronté à ma connaissance à la problématique de la falsification ou de « l'embellissement » des données, ni au plagiat, ni à des conflits d'intérêt.

Je n'ai pas non plus eu à connaître directement des problématiques de partage de la valeur dans le transfert vers les entreprises et aucune *start up* n'est encore issue de mes travaux ! Mes travaux étaient principalement tournés vers des valorisations dans les Eurocodes ou dans des documents méthodologiques, il était question non d'en protéger la propriété intellectuelle mais au contraire de diffuser les résultats aussi largement que possible (les droits des éditeurs ont bien entendu été respectés, les Editions du Moniteur s'agissant de l'ouvrage sur les barrages mobiles de navigation [1], Ponts-Formation-Edition s'agissant du CDROM « ROSA 2000 » [3]).

Quant à l'impact sociétal ou environnemental de mes recherches, ma préoccupation a été de concilier économie et sécurité, comme l'indique le titre de ce mémoire. C'est déjà un « vaste programme ». Mais les questions bioéthiques, les expérimentations sur l'Homme et le vivant, ne concernent pas mes champs de recherche.

2.4.1 Communication et confidentialité

J'ai travaillé à la sécurité des constructions et j'ai eu à connaître d'accidents, dont un très grave (accident de la gabionnade de Cherbourg). Les accidents graves font l'objet de procédures judiciaires et/ou pénales, avec des enjeux considérables : quelles responsabilités de personnes ? quelle répartition de la prise en charge des coûts des réparations et des indemnisations ? quelles incidences sur la réputation et l'image des protagonistes ? Tant que les expertises judiciaires sont en cours il n'est pas envisageable de mener un travail de recherche. Après que l'affaire est résolue il est très difficile d'initier un travail de recherche : aucun protagoniste ne souhaite rouvrir le dossier, même sous l'angle d'une recherche scientifique « désintéressée ». Et même si l'on réouvre le dossier, la discrétion reste souhaitée. Comment concilier la discrétion sur une « affaire » close avec la communication de résultats intéressant une communauté scientifique et technique ?

Le cas de l'accident de Cherbourg est pour moi un bon exemple illustratif d'un comportement éthique et équilibré des parties prenantes. Après la période d'instruction au civil et au pénal et le règlement financier du litige, l'initiative d'un protagoniste (Bureau Veritas) a été couronnée de succès et a permis un travail en confiance à partir des pièces techniques du dossier, tout en portant le sujet sur le plan de la compréhension fine des mécanismes de ruine des « palplanches d'angle ». On remarquera que dans ce contexte très particulier, des résultats scientifiques nouveaux ont été indéniablement obtenus et les résultats de la recherche ont été diffusés d'une manière brève et anonyme, largement et tout à fait efficacement, par l'introduction dans l'EN 1993-5 de la formule de réduction de résistance d'une palplanche d'angle dont j'ai parlé dans la partie 2.2.1. En revanche il n'y a pas eu de publication académique et les rapports de recherche (*background documents*) sont restés au niveau de la

commission de normalisation. La formule a ensuite été reprise dans la littérature technique professionnelle.

Un autre cas de figure intéressant est celui des chocs de bateaux contre les piles de pont (Photo 15). Ma première communication dans un congrès portait sur ce sujet. Stimulé par la lecture de (Knott, 1987), (Terndrup Pedersen, 1993), (Kunz, 1990), (Calgaro, 1991b) et des entretiens avec ce dernier, j'avais interrogé les services de navigation pour recenser les collisions intervenues sur les voies navigables françaises, fort heureusement sans gravité – à l'exception notable de l'accident contre les piles du gazoduc de Richemont sur la Moselle (7 morts en 1982, non du choc lui-même mais à cause de la rupture de la canalisation franchissant le fleuve et qui contenait du monoxyde de carbone). On n'aimait pas parler de cela : ces accidents n'étaient pas très médiatisés, était-il bon de montrer que les voies navigables étaient dangereuses ? Le fait que je cherche à décrire les causes et les enchaînements-type de ces collisions dans une approche « analyse des risques » ne convainquait pas. Comment expliquer que je ne regardais que les données factuelles, en me dissociant totalement de la recherche de responsabilité ?

Je suis quand même parvenu à documenter une dizaine de cas et à en tirer quelques enseignements pour le congrès ICASP7 de 1995 [19]. Une fois que j'eus accès à ces données confiées par les services de navigation, la question de leur réutilisation et de la communication d'une synthèse auprès d'un public académique ne se posait pas. Étaient-elles des « données personnelles » ? A cette époque la sensibilité des données était très loin de ce qu'elle est actuellement. L'usage que j'en faisais poursuivait un objectif d'intérêt général, non contesté. Dans ma communication autour de ces données, je me gardais naturellement de prononcer des jugements de valeur. Mais l'emplacement de l'accident, le nom du bateau en cause, étaient mentionnés comme des informations publiques.



Photo 15. Collision contre le pont Jin Tang, Ningbo, Chine, le 27 mars 2008 (Photo : Beijing Review)

A la suite de cette communication j'ai participé au groupe de travail international de l'AIPCN *Ship collisions with bridges* [4]. De la même manière, chaque membre du groupe de travail a été invité à

communiquer « sa » liste de collisions survenues de par le monde, avec les causes présumées et les conséquences. L'idée était de constituer une base de données internationale qui aurait été enrichie au fil des années par des apports volontaires des sections nationales adhérentes de l'AIPCN.

Certes le groupe de travail a su fournir l'ossature et les premiers éléments de la base de données, mais le projet s'est limité à fournir un rapport (de bonne qualité) sur les principaux déterminants des collisions, les moyens de les prévenir et l'estimation des forces d'impact sur les piles de pont. La sensibilité du sujet avait été sûrement sous-estimée par les membres du groupe de travail. Elle n'a pas échappé à la gouvernance de l'AIPCN au moment de la remise des travaux.

Comment progresser dans les connaissances et améliorer la prévention des accidents sans fâcher ceux qui ont des liens d'intérêt avec les accidents déjà survenus ? Les solutions de compromis sont intéressantes à établir.

2.4.2 *Travaux collaboratifs et propriété intellectuelle*

J'ai été confronté à deux cas de conflit entre la collaboration et la conservation de la propriété intellectuelle. Le premier nous maintient dans le thème des chocs de bateaux. J'avais été invité par J.A. Calgaro à participer à une réunion technique *ad hoc* de la commission de normalisation des Eurocodes sur les actions accidentelles, destinée à clarifier les divergences sur les forces d'impact sur les piles de pont entre la France (dans une annexe du BAEL) et l'Allemagne. Ces valeurs devaient figurer dans la future EN 1991-7. Les Français exposaient le détail du calcul forfaitaire du BAEL avec un modèle simplifié de ressort. Les Allemands donnaient les résultats de tests sur modèles réduits avec des forces beaucoup plus élevées que les « nôtres ». Peu d'informations étaient disponibles sur les conditions expérimentales, les règles de similitude, les dispersions éventuelles des valeurs mesurées. Les Allemands évoquaient une méthode d'analyse des risques développée dans leur institut de recherche qui permettait d'ajuster les valeurs forfaitaires au cas par cas.

La réunion technique n'a pas permis de progresser scientifiquement. Un arbitrage dans le sens de la sécurité a été rendu plus tard par la commission plénière en retenant les valeurs forfaitaires élevées proposées par la partie allemande. Mes regrets ont été que cette commission ne se soit pas jugée compétente pour aborder les conséquences économiques du projet de norme, ce qui lui aurait permis promouvoir un réel compromis entre nous avec des valeurs forfaitaires mieux explicitées et des analyses de risques mieux encadrées.

A la suite de cette expérience et sur la base d'une phrase prononcée lors de la réunion franco-allemande, j'ai lancé un travail sur la conception d'un petit modèle probabiliste de chocs de bateau sous matlab® (Lasquelléc, 1998) pour explorer des pistes alternatives au modèle probabiliste du guide (AASHTO, 1991). Ce travail a été communiqué à l'occasion d'un congrès.

Le second cas date de mes premières années à l'Ifsttar et nous amène dans le domaine de la transition écologique des chaussées routières, sur un projet de recherche lauréat de l'appel « Infravation ». Le consortium *BioRePavation* (2015-2018) était piloté par l'IFSTTAR et comprenait des académiques et industriels français, européens et nord-américains. Son objectif était d'apporter la preuve de concept de la capacité de régénérants bio-sourcés à constituer des enrobés plus durables que les enrobés à module élevé (qui constituaient jusqu'alors la référence). Au début du projet, après la désignation du groupement lauréat et avant la finalisation du *consortium agreement*, l'un des partenaires américains a réclamé une part plus importante dans le projet, en reprochant le coordinateur d'avoir gagné l'appel

grâce à des éléments dont il (l'américain) détenait la propriété intellectuelle. La tonalité était inamicale et juridique.

Bien que n'étant pas concerné par le volet scientifique de ce projet, j'ai été sollicité par la directrice générale de l'Ifsttar pour appuyer la direction internationale et la direction juridique de l'établissement dans le traitement de ce conflit. Les autres membres du consortium sont restés solidaires autour du coordinateur Ifsttar. La réclamation était finalement infondée. Mais il a fallu une intervention de l'agence fédérale US co-financeur, avec la Commission européenne, du programme Infravation, pour que le « partenaire » américain en question se retire, laisse le consortium se reconstituer et engager calmement les travaux prévus. Ceux-ci ont été achevés dans les délais, la bonne entente et à la satisfaction de tous. Par la suite j'ai présenté le dossier devant le comité d'éthique commun à l'Ifsttar et l'Irstea, pour la bonne information de ses membres.

2.4.3 Dilemme coût/sécurité

Le calcul des coefficients de modèle par ajustement global sur les niveaux de dimensionnement antérieurs – c'est-à-dire les coûts – a « évacué » la question évoquée ici, dans la mesure où il n'a pas remis en cause les ordres de grandeur des coefficients partiels déjà introduits dans les Eurocodes.

Le travail sur les ouvrages côtiers a toutefois montré que cette question restait pertinente. Le choix de la période de retour de calcul pour l'action de la houle intervenant dans la vérification des états-limites hydrauliques des digues à talus a, comme on l'a vu, fait apparaître des valeurs élevées, autour de 2 000 ans pour la CC2 (même 4 000 ans pour la CC3). Ces niveaux sont inhabituels dans l'ingénierie hydraulique. Il a fait débat au sein du groupe de travail, et le spectre du « bouleversement de l'économie du secteur » a été évoqué, d'autant que la revue des indices de fiabilité pratiqués pour les justifications assimilables à des ELU (cf. Figure 13) montrait des valeurs plus faibles.

L'éthique commande de ne pas sacrifier la sécurité au long terme pour des économies de court terme. A titre de comparaison, les périodes de retour des crues dimensionnant les barrages-réservoirs peut aller jusqu'à 10 000 ans (cf. Tableau 3). Au final le niveau sécuritaire de la période de retour a été maintenu, sans concession par rapport au niveau-cible des Eurocodes. Le groupe de travail a convenu que les valeurs limite apparaissant à droite des conditions d'état-limite (valeurs limite des franchissements, déplacements admissibles à la limite de ruine) auraient probablement à être ajustées à l'avenir, sous l'égide d'un nouveau groupe de travail à constituer pour examiner le volet « résistances » dans les états-limites des ouvrages côtiers, pour rentrer en cohérence avec les membres de gauche. On peut néanmoins s'attendre à ce que la question émerge à nouveau à l'occasion de l'enquête qui sera lancée sur le projet de norme.

2.5. Formation et transfert de connaissances

2.5.1 Enrichissement et actualisation des supports pédagogiques

J'ai eu l'occasion de transférer mes connaissances, à l'écrit comme à l'oral et dans plusieurs langues (français, anglais), sous des formes et circonstances très variées : publications écrites dans des revues, interventions dans des colloques, enseignements académiques, groupes de travail montés par des « sociétés savantes », commissions de normalisation.

Ces interventions ont été prononcées devant des auditoires très différents : étudiants en formation initiale, professionnels en formation continue, chercheurs des communautés scientifiques intéressées.

Ma participation régulière à des actions d'enseignement m'a montré combien le contact avec les étudiants était enrichissante, comment les échanges avec ce public faisaient évoluer le regard sur les matières enseignées.

Je rappellerais ici tout particulièrement les questions ou remarques des étudiants de mastère spécialisé qui ont déjà une expérience professionnelle derrière eux et qui témoignent volontiers de l'usage qu'ils font des normes et des Eurocodes. On se rend compte de la souplesse ou de la raideur avec laquelle les clauses sont appliquées, sous le regard de la maîtrise d'œuvre et du bureau de contrôle technique. J'en ai tiré la conviction que mon cours gagnait en pertinence à relativiser l'importance des coefficients de sécurité (un coefficient de sécurité permet de se prémunir d'événements plus rares que l'événement caractéristique, mais il ne palliera jamais une grosse erreur commise dans l'appréciation de l'événement caractéristique) et à mettre davantage de poids sur les facteurs organisationnels et humains, sur la qualité d'exécution des travaux, sur le respect des charges admissibles données dans les règles d'exploitation.

« *Comment osez-vous dire qu'on doit faire des compromis avec la sécurité ?* » Cette remarque est stimulante... Comment faire passer les étudiants d'une conception initiale de la sécurité « en tout ou rien » à une conception plus nuancée, où il y a des degrés de sécurité parce qu'il y a des degrés de connaissance ?

En ce qui concerne les interventions régulières en université ou école d'ingénieur, j'ai cherché à actualiser systématiquement les contenus de mes cours pour suivre l'évolution des Eurocodes et de leurs documents d'application en France, pour réfléchir aux problématiques grandissantes du changement climatique, pour donner des clés supplémentaires sur les analyses de risques et des exemples tirés de nouveaux domaines avec lesquels je pouvais être en contact (cybersécurité, sécurité du travail, sécurité industrielle, risque rocheux, sécurité des ouvrages souterrains...).

J'ai pratiqué plusieurs modes de contrôle des connaissances : le mini-projet « à la maison » ; l'examen écrit en salle avec du calcul, des questions de cours, un commentaire de texte ; l'examen oral. La matière que j'enseigne ne vise en fait pas le calcul, même si l'on peut facilement concevoir des sujets calculatoires sur des fractiles, des périodes de retour ou des probabilités de ruine. Elle vise à améliorer la compréhension de l'analyse de risque sous-jacente aux règles édictées dans les Eurocodes et autres codes de calcul : la dissertation et le commentaire de texte seraient tout à fait appropriés... mais nous n'avons pas affaire à des littéraires... d'autant que dans certaines formations la maîtrise du français reste un enjeu. Chaque fois que c'est possible je privilégie l'examen oral individuel sur un sujet choisi par l'étudiant entre deux qu'il aura tirés d'enveloppes prises au hasard. L'échange que nous avons au cours de l'examen oral est souvent enrichissant pour moi – et m'incite à l'humilité. On est je pense mieux en capacité d'apprécier ce que l'étudiant a assimilé du cours, les rapprochements qu'il peut faire avec d'autres enseignements qu'il a suivis, avec des projets ou stages qu'il a effectués. On identifie ce qu'il n'a pas bien compris : à de nombreuses fois j'ai au sortir de l'oral modifié telle ou telle expression de mon cours pour être plus précis et mieux me faire comprendre.

2.5.2 Importance des mots et des expressions employées

En effet des expressions ont été adoptées dans le langage courant qui, sans être inexactes, ne reflètent pas tout à fait rigoureusement les concepts de sécurité des Eurocodes et peuvent être trompeuses. Par exemple :

- Tout *état* de l'ouvrage n'est pas forcément un *état-limite* ;
- Nous disons tous : *Calculer à l'ELU, calculer à l'ELS*, mais il serait plus correct de dire au risque d'être long : *Vérifier un état-limite qui relève de la catégorie des ELU, ou des ELS, avec une modélisation appropriée du comportement de l'ouvrage et un niveau de sécurité (c'est-à-dire une combinaison-type d'actions) approprié* ;
- *L'ELU fondamentale* est un raccourci pour dire : *combinaison-type fondamentale, utilisée pour vérifier les ELU en situations durables ou transitoires* ; de même *l'ELU accidentel* est un raccourci pour dire : *combinaison-type accidentelle, utilisée pour vérifier les ELU en situations accidentelles* » ; et *l'ELS rare* est un raccourci pour dire : *combinaison-type caractéristique (encore appelée combinaison-type rare), utilisée pour vérifier certains ELS en situations durables ou transitoires* ;
- Quand on dit : *le coefficient de sécurité de ce talus est 1,30, sachant que le coefficient minimum (coefficient global) requis est 1,50*, on signifie en fait que : *le facteur de dimensionnement du talus est $0,87 = 1,30 / 1,50$* (Photo 16 – cette application numérique est fictive).



Photo 16. *Quel est le « coefficient de sécurité » du talus ?* Rupture de talus de la LGV Est à Ingenheim, Bas-Rhin, ayant entraîné un déraillement le 5 mars 2020 (Photo : rapport d'enquête technique du BEATT)

On ne prétendra pas que le format de sécurité des Eurocodes n'ait une certaine complexité ! En expliquant son application aux ouvrages en site aquatique il est bon d'insister sur quelques chausse-trapes, qui peuvent être perçus en toute première réaction comme des paradoxes. Par exemple :

- Un ELU n'est pas systématiquement vérifié avec la combinaison fondamentale (quand on est dans une situation accidentelle on le vérifie avec la combinaison accidentelle) ;
- Ainsi, le choix de prendre une valeur caractéristique ou une valeur de calcul pour faire une vérification dépend de la combinaison-type pertinente (fondamentale, caractéristique, accidentelle...), mais pas directement de la nature de l'état-limite (ELU / ELS) ;

- Un ELS n'est pas forcément un calcul en déformations (exemple : les ELS de capacité portante des fondations), un ELU n'est pas forcément un calcul en contraintes (exemple : l'ELU de décompression d'une fondation superficielle) ;
- Un état-limite « à valeur admissible » n'est pas systématiquement un ELS ; il peut être classé selon le cas aussi bien comme ELU ou comme ELS (exemple : les déplacements des blocs de protection des digues) ;
- Le fait qu'un état-limite soit dimensionnant ne veut pas dire que sa probabilité d'occurrence soit plus faible ou plus forte (mais c'est que son facteur de dimensionnement est le plus faible).

Enfin il faut prendre garde à certaines confusions qui peuvent apparaître :

- Entre la *combinaison-type d'actions* (fondamentale, quasi-permanente...), le *cas de charge* (poids propre + charge d'exploitation + accostage...), les *déclinaisons* (selon le caractère favorable ou défavorable des paramètres du calcul, selon la position de base ou d'accompagnement des actions variables) ;
- Entre l'*état-limite* (conséquence) et l'occurrence d'une *valeur extrême d'une action* (cause) ;
- Entre la *période de retour* d'une intensité donnée d'une action (telle valeur de la vitesse du vent, telle hauteur de vague...), la *durée d'utilisation de projet* (DUP) de l'ouvrage étudié (à ne pas confondre non plus avec sa déclaration d'utilité publique !), la *durée d'observation* sur laquelle on dispose des données du milieu naturel ;
- Entre le *facteur de conséquence* k_f qui multiplie les coefficients partiels applicables aux actions : sa valeur dépend de la classe de conséquence (mais en France c'est toujours 1,00), et le *facteur d'importance* ϕ_i qui multiplie la période de retour marginale (caractéristique et de calcul) du paramètre météocéanique dominant, et la période de retour jointe : sa valeur dépend de la classe de conséquences de l'ouvrage étudié.

Rien d'étonnant qu'il y ait encore des difficultés à se comprendre, surtout quand les Eurocodes abordent des domaines nouveaux comme les ouvrages portuaires et côtiers.

2.5.3 Application sur le terrain

En appliquant mes résultats au dimensionnement du 3^e quai en Seine de Honfleur, je suis « passé de l'autre côté de la barrière ». Ce projet a été utilisé pendant plusieurs années dans les supports pédagogiques de mes enseignements, jusqu'à ce que le format des coefficients partiels à la source sur les propriétés des sols soit remplacé par les coefficients partiels de résistance.

Il s'agissait une dalle béton sur pieux de 120 m de long sur 35 m de large, en avancée sur l'estuaire de la Seine, la berge étant retenue par un rideau de palplanches adossé à la file arrière de pieux et ancré sur un petit rideau arrière par un lit de tirants métalliques (Figure 21, Photo 17).

J'ai rédigé la partie « hypothèses de calcul » du CCTP en reprenant les recommandations ROSA 2000 avec les coefficients partiels à la source. L'application à la méthode élasto-plastique de calcul des pressions du sol nécessitait de considérer deux diagrammes d'interaction sol-écran : un « diagramme caractéristique » dans lequel les paliers de poussée et de butée étaient calculés avec les valeurs caractéristiques de la résistance au cisaillement du sol, et un « diagramme de calcul » dans lequel les paliers de poussée et de butée étaient calculés avec les valeurs de calcul de la résistance au cisaillement du sol, mais le coefficient de réaction et le coefficient de pression au repos restaient tous les deux pris à leur valeur caractéristique. Le rapport de la reconnaissance géotechnique et géologique

(4 sondages pressiométriques, 2 sondages carottés avec prélèvement d'échantillons) donnait la stratigraphie et les valeurs caractéristiques des couches de sol rencontrées et les valeurs caractéristiques ont été déterminées en appliquant la méthode de l'article [11] (cf. section 2.2.2). Outre l'accostage et l'amarrage des navires, les charges d'exploitation sur le quai étaient constituées par le stockage des marchandises, les descentes de charge de deux grues sur rail et d'une grue sur pneus. Les dénivelées hydrostatiques et leurs variations étaient prises en compte.

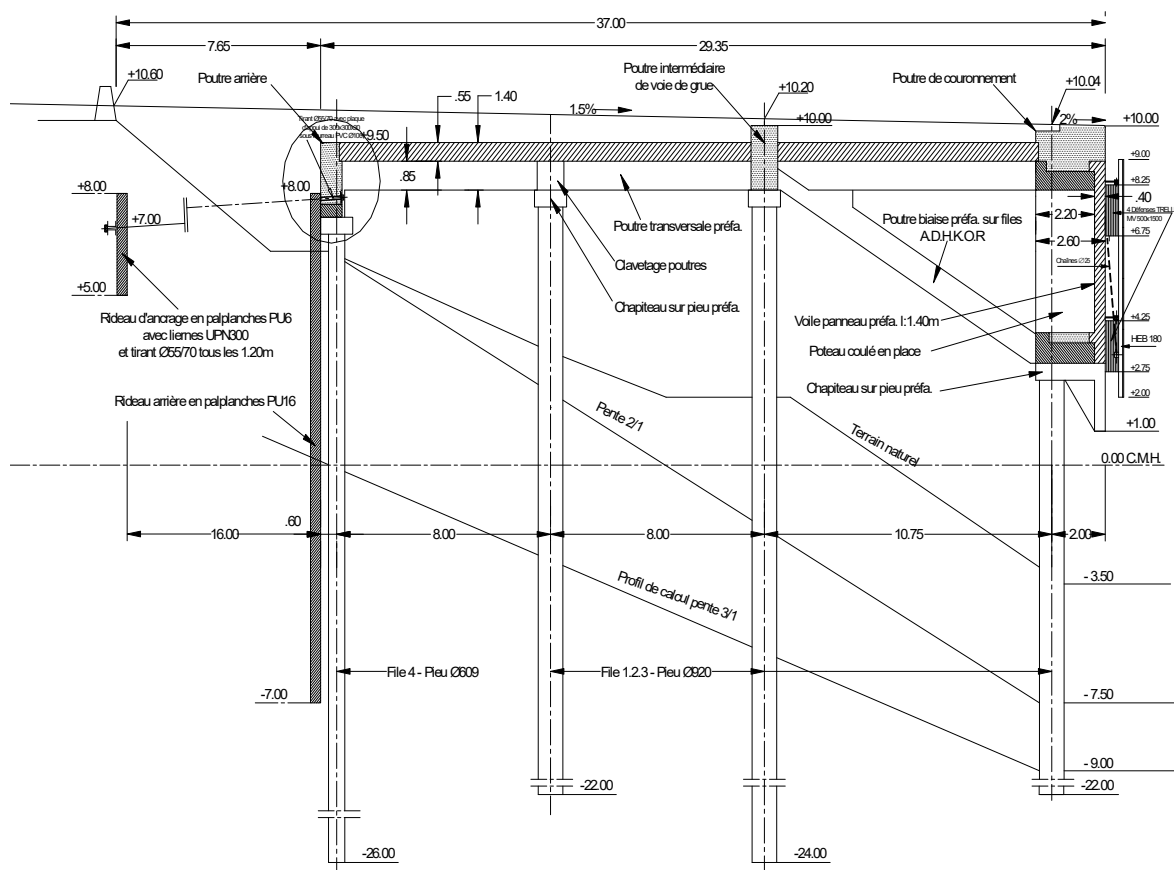


Figure 21. Coupe du 3^e quai en Seine à Honfleur, solution de base (source [28] et [29])

Cette expérience a été extrêmement utile. J'en ai relevé trois enseignements principaux :

- La pertinence d'une démarche structurée par les Eurocodes pour rechercher les arrangements spatiaux les plus défavorables des charges d'exploitation. En effet la charge de stockage était susceptible de s'exercer sur tout ou partie du quai, les grues sur rails et la grue sur pneus étaient susceptibles de se trouver à tous emplacements physiquement atteignables. Pris dans la démarche Eurocodes, le projeteur a engagé une recherche plus systématique qu'à son ordinaire des arrangements spatiaux dominants. Il a rapporté avoir abouti à des configurations plus sévères que celles qu'il avait considéré au moment du prédimensionnement, et auxquelles il se serait tenu sous un CCTP « classique » ;
- L'intérêt de compléter le format des Eurocodes en introduisant les « simulations des phases de chargement » de la méthode élasto-plastique, au cours desquelles s'applique le « principe de cohérence » : ainsi il y a une simulation avec les valeurs non pondérées des propriétés des sols,

dans laquelle on passe les situations durables et transitoires en vérifiant les ELS, puis les situations accidentelles en vérifiant les ELU ; et une simulation avec les valeurs pondérées des propriétés des sols, dans laquelle on passe les situations durables et transitoires en vérifiant les ELU ;

- La nécessité de simplifier *in fine* le format, vu le nombre excessif de déclinaisons des combinaisons d'actions à calculer et le risque de s'y perdre (importance de conserver le sens des ordres de grandeur).

Cette application à un projet réel est assimilable à une démarche de formation sur le tas d'un collectif comprenant la maîtrise d'ouvrage, la maîtrise d'œuvre, l'entreprise et les bureaux d'études spécialisés.



Photo 17. Construction du 3^e Quai en Seine du port d'Honfleur (Haropa), Calvados (photo : société EMCC)

Un retour d'expérience conjoint a été organisé. Il en ressort une appréciation partagée que les niveaux de sécurité sont plus explicites, que l'intérêt de la démarche est de traiter les incertitudes « là où elles se trouvent », que le dialogue et la communication sont améliorés entre les acteurs (hydraulicien, géotechnicien, génie civiliste, conduite de travaux, exploitant...), sans incidence sur le coût total de l'ouvrage. En revanche la démarche exige beaucoup de rigueur, notamment dans l'acquisition des données et l'élaboration des combinaisons d'actions et de leurs déclinaisons, il faut absolument maîtriser le nombre de « cas de calcul » et de « simulations », en n'hésitant pas à faire des prédimensionnements et à rechercher des variantes intéressantes de conception avec le format des coefficients globaux.

2.6. Construction et mobilisation d'un réseau national et international

L'insertion dans les réseaux nationaux et internationaux est une nécessité vitale pour tout acteur de la recherche. Je décris ici les deux réseaux dans lesquels j'ai pu me maintenir au cours du temps : AIPCN (PIANC) et le génie côtier. Je ne décrirai pas trois autres réseaux auxquels ma participation a été bien moins soutenue et que je « n'entretiens » pas faute de disponibilité : (i) le FEHRL et le réseau PIARC (*World Road Association*), avec lesquels nous avons fait un excellent *scanning tour* en Asie en 2016 puis travaillé sur la résilience des infrastructures ; (ii) le réseau du T20, où je suis rentré en 2018 par l'intermédiaire de l'*International League* de Paris-Est Sup montée à l'époque par Nicolas Buchoud et Cécile Delolme, pour lequel j'ai coordonné – avec notamment des membres de PIARC – la rédaction de trois *policy briefs* sur la résilience [32], [34], [36], sur la neutralité carbone de la construction [35] et sur le véhicule autonome [33] ; (iii) le réseau des ITS (*Intelligent Transport Systems*) dans la gouvernance duquel j'ai œuvré quelques années, en préparant et participant aux congrès européens (Strasbourg 2017) et internationaux (Copenhague 2018, Singapour 2019), sans compter les colloques nationaux organisés annuellement à Montrouge par l'association française ATEC-ITS.

2.6.1 AIPCN/PIANC

Je suis entré à l'AIPCN/PIANC à mon arrivée au STCPMVN en 1993. Cette association fondée en 1885 est forte de sections nationales dans 43 pays sur tous les continents, comptant plus de 500 entreprises membres et 1600 adhérents à titre individuel. Elle comprend quatre commissions techniques qui portent sa production de référentiels internationaux (plusieurs centaines de références, régulièrement actualisées) : maritime, fluvial, environnement, plaisance.

Après avoir pris connaissance des personnes et de l'esprit de l'association au congrès international de Séville (1994), je suis rentré dans le groupe de travail sur les chocs de navires. J'ai publié plusieurs articles dans le Bulletin de l'association [37], [38], fait une communication aux congrès de La Haye (1998) [21] et Sydney (2002) [39], présidé une session au congrès de Liverpool (2010), ai assuré le secrétariat de la commission maritime MarCom de 2008 à 2012 et présidé le comité scientifique de SmartRivers 2019. Aujourd'hui je me concentre sur les Rencontres de l'Ingénierie Maritime (1^{ère} édition en 2022), toujours dans la « PIANC family ».

Je pense avoir beaucoup apporté et beaucoup reçu du réseau AIPCN, y compris de sa section française dont font partie le Cerema, l'université Gustave Eiffel et bon nombre de partenaires mentionnés dans ce mémoire.

2.6.2 Génie portuaire et côtier

Le réseau du génie portuaire et côtier est plus académique que le précédent. J'y suis entré par le projet PROVERBS. Le contact avec les établissements d'enseignement supérieur et les encadrements de stage m'ont ouvert les portes du Centre français du Littoral et de ses colloques Génie civil – Génie côtier, avec des communications et présidence de sessions à Toulon (1998) [20], Anglet (2002) [27], Compiègne (2004) [29]. Je suis intervenu au congrès *Coastal Structures* de Santander (1999) [24] et presque vingt-cinq ans plus tard mais en ayant maintenu le lien par le canal de l'AIPCN, au congrès *Breakwaters* de Portsmouth (2023) [30].

Ce réseau va être mobilisé dans les années qui viennent, et le départ a déjà été lancé, pour la révision du *Rock manual* ou *Guide enrochements* (2009) dont le Cerema est l'un des co-éditeurs. Outre l'incorporation des nouvelles connaissances et retours d'expérience sur le comportement des enrochements sous l'effet des houles, des courants fluviaux et de marée, des courants générés par les organes de propulsion des navires et bateaux, l'enjeu est d'y introduire le format semi-probabiliste des Eurocodes (une nouveauté pour les acteurs de ce domaine, portée par la future norme EN 1991-1-8) et d'aborder concrètement les conséquences du changement climatique sur le dimensionnement des digues.

Partie 3. Synthèse des acquis de l'expérience

3.1 Acquisition des compétences doctorales

Je tente ici une synthèse de mes acquis de l'expérience en suivant le référentiel de compétences doctorales de Paris-Est Sup (annexe I).

La première compétence concerne la *problématisation d'une question de recherche*. J'ai développé cette compétence en situant la question de recherche de manière critique par rapport à l'état de l'art, représenté par les Eurocodes et la théorie de la fiabilité, à l'occasion des projets « Valeurs caractéristiques des propriétés des sols » (cf. section 2.2.4) et « Barrages » (cf. section 2.2.6). La faisabilité scientifique de l'application de la théorie semi-probabiliste aux ouvrages maritimes s'est révélée finalement d'une nature assez proche de celle de l'application aux ouvrages géotechniques. L'identification des lacunes, des failles et des limites de la question de recherche est un vrai enjeu, indispensable à l'emploi efficient des ressources, et représente une compétence clé pour un vice-président Appui aux politiques publiques. Les questions liées au « risque » nécessitent, je dirais par construction, de pouvoir intégrer la globalité et la complexité des phénomènes étudiés : cette compétence très importante s'est développée au fil du temps, grâce notamment aux échanges entre pairs et avec les praticiens. Enfin la capacité à proposer une démarche de recherche planifiée a été nourrie par l'expérience de la démarche « ROSA », pour l'adaptation du format de sécurité des Eurocodes à la vérification de toute une diversité d'ouvrages maritimes et fluviaux (cf. section 2.2.5).

Il s'agit ensuite de savoir *développer une démarche inédite*. Créer des savoirs nouveaux, en assurer leur validité, ces activités s'inscrivent dans la définition même de la recherche que j'ai menée à l'occasion de chacun des projets auxquels j'ai participé. Les problématiques, à la rencontre entre le milieu aquatique et les Eurocodes, se sont bien sûr précisées dans le temps, mais dans le fond elles ont assez peu évolué. Le rythme auquel la recherche a été poursuivie a bien sûr dépendu des moyens à disposition, en premier lieu les plages que j'y ai consacrées dans mon emploi du temps. Je pense que la poursuite d'activités scientifiques au milieu des responsabilités opérationnelles des postes occupés, tant au Port de Rouen que dans l'administration centrale du ministère en charge du développement durable, assurent une aptitude à gérer le stress et l'incertitude, en faisant preuve d'autonomie. Par ailleurs j'ai été tout particulièrement attentif à l'impact de mes travaux dans l'évolution du corpus normatif, voire réglementaire, français et européen, et de nouvelles perspectives ont été dégagées vers les barrages, les ouvrages existants, la fusion de données) même si celles-ci ne se sont pas concrétisées dans de nouveaux programmes d'ampleur.

Le référentiel de Paris Est Sup mentionne le *travail en collaboration*, tout d'abord en confrontant ses réflexions, ses expériences et ses méthodes avec d'autres chercheurs et doctorants de manière systématique. Initiée et exercée dans le cadre des projets « PROVERBS » (cf. section 2.2.3) et « Gabions » (cf. section 2.2.1), je n'ai pas poursuivi cette démarche de manière systématique par la suite, étant avant tout immergé dans un milieu professionnel non académique. Toutefois j'ai cherché à créer mes propres réseaux internationaux et nationaux sur mes thématiques par la participation à des conférences (dont une conférence invitée) et à des jurys de thèse, par le *reviewing* d'articles dans mon domaine, par la participation active à des comités scientifiques de conférences, etc. C'est ainsi que des relations de complémentarité ont pu se nouer avec un éventail de partenaires et d'organisations, et que j'ai été reconnu quand on m'a confié des responsabilités et je citerai ici le secrétariat de la commission maritime de PIANC, la présidence du conseil de perfectionnement de

Builders-Ecole d'ingénieurs (anciennement ESITC Caen), l'expertise dans le groupe de travail du CEN pour les actions du milieu maritime sur les ouvrages côtiers.

L'exigence tant sociale qu'académique d'une *posture scientifique responsable et éthiquement construite* n'a cessé de se renforcer au cours du temps. Appliquer les règles de déontologie de base c'est présenter honnêtement ses résultats quand bien même ils décevraient les attentes que l'on avait sur eux a priori, et rejeter tout plagiat. Ces règles prennent un sens particulier très intéressant dans le cas d'une recherche prénormative sur la sécurité des constructions. En effet la valeur d'un coefficient de sécurité sur une propriété de matériau peut être l'objet de pressions, dans un contexte de compétition économique entre partis constructifs (construction en béton vs construction en acier, par exemple). Le référentiel de Paris Est Sup signale l'importance de conserver un regard critique et une indépendance dans le choix des méthodologies et sur les résultats obtenus : cette compétence qui s'inscrit dans les principes mêmes d'une démarche de recherche, a été développée à l'occasion de ma participation aux projets. Elle permet de garantir la fiabilité et la validité des nouveaux savoirs, par l'intervention des relecteurs, par les échanges avec une communauté scientifique active. Cela n'empêche toutefois pas que les nouveaux savoirs ou certains choix méthodologiques soient remis en cause un jour, comme en témoigne l'abandon du format basé sur la complémentarité « coefficients de modèle / coefficients à la source » pour le format beaucoup plus pratique des coefficients partiels d'action et de résistance. Car c'est une recherche finalisée que j'ai menée, avec comme objectif d'atteindre un compromis socialement acceptable entre fiabilité, durabilité et économie, dans la conception et le dimensionnement des ouvrages en site aquatique.

Il s'agit aussi de *diffuser et partager les nouveaux savoirs*. Les canaux de diffusion (numériques et autres) et leurs conditions d'utilisation ont considérablement évolué depuis le début de mes travaux dans les années 1990 ! Les résultats ont été diffusés sur différents supports, depuis les supports classiques jusqu'à des supports innovants pour l'époque (ROSA 2000 a été diffusé sur un CD Rom « intelligent » contenant un moteur de navigation interne). Ai-je été confronté à une problématique de complémentarité ou de confrontation avec des savoirs concurrents ? Cette question a pu se poser quand il s'agissait de faciliter la transition entre les méthodes traditionnelles de justification des ouvrages aux coefficients globaux et la méthode semi-probabiliste aux états-limites des Eurocodes. Pour pertinente et valorisante que soit cet élément compétence, je reconnais qu'il n'est pas aisé à développer. Enfin une part non négligeable de mes publications a ciblé le public professionnel, et je me suis investi avec constance dans des interventions de niveau Master qui ont toujours été appréciées positivement par les UFR correspondantes. Aussi j'estime avoir été capable de rendre mon travail de recherche compréhensible et abordable pour différents publics, plus ou moins spécialisés (les spécialistes des Eurocodes ont peu de connaissance en dimensionnement hydraulique, l'ingénierie maritime et fluviale ignorait jusqu'à peu le langage semi-probabiliste).

La dernière compétence mentionnée est de *faire évoluer son projet professionnel*. La présente démarche de doctorat par VAE après une trentaine d'années d'une vie professionnelle variée me semble répondre à l'objectif de connaître ses propres ambitions en cherchant un parcours adapté. La confrontation des réflexions avec d'autres chercheurs et professionnels s'est développée dans la première partie de ma carrière, au sein du service technique devenu ultérieurement le Cerema, et a pu reprendre à mon arrivée à l'Ifsttar en 2015.

La capacité à expliciter l'évolution et la transférabilité de mes propres compétences a été initiée par la participation à des actions variées de formation étudiante depuis une vingtaine d'années déjà. En tout état de cause son développement constitue l'un de mes objectifs personnels pour les prochaines années, en collaboration avec l'écosystème de recherche de la Comue Paris Est Sup.

3.2 Où en est-on dans la prise en compte de l'incertain dans le dimensionnement des ouvrages de génie civil ?

Comme je commençais à évoquer dans la section 1.6.3, les centres d'intérêt scientifiques se sont substantiellement déplacés depuis une trentaine d'années.

A mon entrée dans le milieu scientifique dans les années 1990, l'objectif était de rationaliser le dimensionnement des ouvrages de génie civil en faisant converger les niveaux de sécurité (représentés par les probabilités de ruine sur la durée de vie de l'ouvrage) vers des niveaux-cibles communs et optimaux, déterminés dans les Eurocodes en fonction de l'importance de l'ouvrage (modulation des niveaux de sécurité-cibles selon les classes de conséquence).

Les ouvrages en site aquatique apparaissaient un peu mystérieux : les structures étaient au fond les mêmes qu'en site terrestre (caissons, parois, dalles, pieux), avec les mêmes matériaux (béton armé, acier), mais soumises à des « charges d'exploitation » très spécifiques (actions dues aux navires, aux marchandises, aux outillages, aux équipements électro-mécaniques et leurs effets dynamiques : comment combiner toutes ces actions entre elles en restant au « bon » niveau de sécurité ?) avec des conditions de mise en œuvre plus difficiles (agitation du milieu marin ou fluvial), plusieurs systèmes structurels à considérer (interactions du génie civil avec le sol, avec l'eau libre, avec les organes de manœuvre des parties mobiles) et des fortes exigences de durabilité. Il y avait aussi une série d'ouvrages (digues à talus, berges fluviales, bassins de dissipation des barrages mobiles...) sans beaucoup de formules analytiques pour le dimensionnement, et dont on faisait principalement l'étude sur modèles réduits physiques. Plusieurs problèmes pratiques se posaient donc pour l'application des Eurocodes : quels « états-limites » définir ? les coefficients de sécurité partiels établis pour les structures terrestres restaient-ils valables ? Quelles valeurs alternatives leur donner, et comment déterminer celles-ci ?

Le domaine géotechnique était lui aussi vivement interpellé par un format de sécurité des Eurocodes développé à l'origine pour le calcul des structures. Qu'est-ce en effet qu'une « valeur caractéristique » quand on a l'habitude de travailler avec des « valeurs de projet » ? Quel est le sens de la méthode des coefficients partiels quand le sol intervient à la fois comme action et comme résistance ? A quels paramètres géotechniques faut-il appliquer les coefficients partiels ? Sous le regard d'une communauté géotechnique perplexe, la possibilité offerte par la norme européenne de choisir entre trois approches différentes témoignait de l'échec à obtenir un consensus rapide sur ces questions.

Depuis cette époque je constate que des progrès considérables ont été faits. On peut en être fiers. Des méthodes scientifiquement fondées ont été imaginées, développées, testées et validées pour la détermination des valeurs caractéristiques des propriétés des sols, des actions portuaires, des actions de la houle et du courant. Des règles de combinaison des actions variables ont été posées et pour chacune d'entre elles on sait calculer ses « valeurs de combinaison », tant au niveau de sécurité de la combinaison type fondamentale qu'au niveau de sécurité de la combinaison type caractéristique. En utilisant judicieusement les souplesses du format européen, on a pu définir « au sens des Eurocodes »

les états-limites des ouvrages soumis principalement aux actions hydrauliques (digues, barrages) et, au-delà, renouveler la compréhension de la différence structurante entre ELS et ELU par croisement avec le domaine de l'analyse des risques. La notion initiale de coefficient de sécurité issu de la théorie de la fiabilité a été dépassée quand (action de la houle) on a défini la valeur de calcul directement en référence à une période de retour de calcul et non plus comme l'application d'un coefficient partiel à une valeur caractéristique. Enfin le consensus s'est construit en France autour de l'approche géotechnique la plus immédiate (approche 2) et les valeurs des coefficients partiels donnés dans la norme européenne ont été complétés par des coefficients de modèle spécifiques γ_{Rd} calés selon les méthodes appropriées. La norme NF P 94-500 est venue préciser opportunément la consistance des missions géotechniques tout en soulignant le nécessaire accroissement des connaissances des sols au fur et à mesure de l'avancement des projets.

Ces progrès étant acquis, on voit néanmoins aujourd'hui que le désir initial de rationalité, de convergence vers des niveaux de sécurité communs optimaux pour le dimensionnement des ouvrages de génie civil, s'est heurté à la réalité économique des secteurs de la construction. Cela veut dire que loin de se baser sur des probabilités-cibles de ruine et sur des études probabilistes de détermination des coefficients partiels, les valeurs des coefficients partiels ont été déterminées en premier lieu pour conserver l'économie existante (c'est-à-dire les quantités de matériaux nécessaires, et partant les coûts) des ouvrages. Tant que les niveaux de dimensionnement traditionnels reconnus par la profession, les maîtres d'ouvrage, et les maîtres d'œuvre, reflètent des niveaux de risque acceptable du point de vue socio-politique, cette approche n'est pas illégitime.

Toutefois l'urgence n'est plus aujourd'hui d'harmoniser les méthodes de calcul du génie civil au sein de l'espace économique européen. En complément de la section 1.6.4 sur les futurs sujets de recherche, je souligne dans cette conclusion quatre enjeux principaux : (i) avec un taux d'équipement en infrastructures qui a atteint globalement un bon niveau, il s'agit désormais d'harmoniser les méthodes d'évaluation de l'état structural et de re-calcul des ouvrages existants : concevoir et dimensionner des renforcements pour prolonger la durée de service de l'ouvrage (à défaut de le démolir et d'en reconstruire un autre), et/ou adapter les règles d'exploitation (charges admissibles) consécutivement à l'affaiblissement de l'ouvrage – dont on aura su stopper la progression des dégradations ; (ii) il s'agit également de réviser les hypothèses de calcul pour prendre le compte le changement climatique : la fréquence croissante des fortes températures et du stress que cela provoque sur les matériaux ou sur les sols de fondation selon leur nature, l'évolution du régime des vents, de la houle et du niveau marin, des débits fluviaux selon les parties du territoire, y compris dans les Outre-mers, etc. ; (iii) l'introduction de nouveaux matériaux de construction (bois, terre crue, matériaux composites, bétons bas carbone, bétons de chanvre, liants bio-sourcés...) et des matériaux recyclés (granulats de bétons de démolition, agrégats d'enrobés de chaussée...) nécessite de mieux connaître non seulement leur comportement mécanique et leur tenue physico-chimique dans le temps, mais aussi d'évaluer les incertitudes spécifiques y afférentes ; (iv) enfin le développement considérable des possibilités d'instrumentation et d'inspection/imagerie des ouvrages tant en cours de construction (*méthode observationnelle* de dimensionnement) qu'en service ouvre des perspectives nouvelles sur un « dimensionnement adaptatif tout au long de la vie » et de mettre en débat les stratégies d'entretien et de maintenance (préventive, corrective...), d'autant que le vieillissement n'affecte pas uniformément les ouvrages et peut être la cause de défaillances localisées ou partielles. La croissance des données pouvant être acquises pendant la durée de service pourrait d'ailleurs conduire à questionner la notion d'états-limites de service et leur distance aux états-limites ultimes.

Par ailleurs, la montée de *l'approche performantielle* venant se substituer à *l'approche prescriptive* actuelle modifie les concepts de prise en compte de l'incertain. Alors que l'approche prescriptive est basée sur des exigences de composition du matériau béton, liées aux classes d'exposition, l'approche performantielle est basée sur des indicateurs de durabilité et des modèles calibrés des différents chemins de dégradation pris en compte. Cette approche s'inscrit dans la recherche d'une réduction raisonnée des quantités de matériaux à mettre en œuvre (notamment sur l'enrobage des armatures) tout en respectant l'exigence de durabilité. A la prise en compte des incertitudes sur la composition du matériau s'ajoutent donc celles sur les processus et cinétiques de dégradation.

Plus généralement, à la méthode « semi-probabiliste » de prise en compte de l'incertain par les Eurocodes – dans laquelle les coefficients de sécurité sont imposés – pourrait se substituer progressivement une nouvelle méthode basée sur l'analyse de risques (*Risk Informed Decision Making*) autorisée dans le projet de révision de l'Eurocode 1990. Dans celle-ci la probabilité admissible de ruine, ni *a fortiori* les coefficients partiels, n'est pas imposée de manière uniforme par classe de conséquences, mais elle est déterminée au cas par cas selon l'étendue de risques auxquels la rupture de l'ouvrage exposerait son environnement : pertes de vies humaines, pertes d'exploitation, coûts de reconstruction, atteintes au bon état du milieu naturel... Cette perspective est très stimulante. Conduira-t-elle à une vraie transformation ? car on n'évitera pas la comparaison avec le dimensionnement semi-probabiliste !

Jusqu'à présent c'est surtout un *incertain probabilisable* que l'on a pris en compte dans les règles de dimensionnement. Le retour d'expérience des ruines, pathologies et incidents affectant les ouvrages montre toutefois que ce sont des *incertitudes radicales*, peu ou pas probabilisables au sens fréquentiste du terme, qui sont les plus grandes causes de ces désordres. De surcroît la réalité du changement climatique introduit un terme supplémentaire d'incertitude radicale pour le dimensionnement. Il s'ensuit que la « philosophie » de la sécurité du génie civil est amenée à évoluer encore. Les méthodes de la prospective, les méthodes des scénarios (par exemple les scénarios RCP du GIEC) pourront venir compléter la boîte à outils. A l'exigence de *robustesse* des Eurocodes prise en compte par des situations accidentelles pourrait s'ajouter une exigence de *résilience* prise en compte par des conceptions et dimensionnements adaptatifs, comme la méthode observationnelle de dimensionnement interactif des ouvrages (Allagnat, 2005).

Avec ces évolutions, prévisibles ou non, ces changements et transitions, l'adaptation rapide est une condition nécessaire de survie. La demande de méthodologie / normalisation en est d'autant plus intense. Elle s'approche des frontières de la pratique des milieux professionnels, elle exige de raccourcir le temps de l'innovation, de passer plus rapidement de la nouveauté de la connaissance à son application et à ses généralisations. Pour gagner en efficacité dans le long processus de normalisation, l'Afnor développe depuis quelques années les Afnor Spec dont l'objectif est « *d'accompagner des acteurs innovants peu familiers de la normalisation sur des sujets non matures et désireux de décrire des bonnes pratiques à partager avec d'autres. Le document de référence qui en résulte peut servir de base à la construction d'une norme « classique » ultérieurement, une fois le sujet plus mûr. C'est en quelque sorte un avant-goût de la norme [...] Après publication, une Afnor Spec a une durée de vie initiale de 5 ans renouvelable par période de 3 ans. A l'issue de cette période, Afnor consulte les participants de la plate-forme et les commissions de normalisation concernées pour déterminer si l'Afnor Spec est transformée en norme, maintenue, révisée ou supprimée.* » Il ne s'agit pas d'une exception française : « *les organismes nationaux de normalisation proposent cette solution*

en alternative ou en complément de leur gamme classique de normes. C'est le cas du DIN en Allemagne avec ses DIN SPEC et BSI au Royaume-Uni avec ses BSI PAS (Publicly Available Specification). Au niveau européen, le CEN propose des CWA (CEN Workshop Agreements)» (cf. site web Afnor, <https://normalisation.afnor.org/nos-solutions/afnor-spec/faq/>).

Cette demande de pouvoir disposer aussi rapidement que possible de documents de référence interpelle la recherche. Elle conduit à porter un nouveau regard sur les enjeux – souvent peu voire pas identifiés dans les milieux universitaires – de la *recherche prénormative*. En reprenant les propos de V. Archambault (2020) : « *La recherche produit des connaissances scientifiques, techniques, économiques, sociologiques, etc., souvent indispensables au développement de solutions innovantes (technologies, produits, services, systèmes, systèmes de systèmes...). Ces innovations présentent un avantage sur la génération précédente [...] mais elles présentent également des inconvénients [...] Impossible d'identifier les solutions qui constituent un réel progrès sans cette recherche prénormative qui donnera lieu à des normes, des lois ou des labels, autant d'obligations, d'incitations ou d'interdictions permettant de cadrer l'usage et la valorisation de l'innovation* ».

C'est au travers de nouvelles recherches prénormatives répondant avec diligence aux enjeux contemporains de préservation des ressources, de durabilité des ouvrages de génie civil et d'adaptabilité des fonctions, que devrait se poursuivre le dialogue entre sécurité et économie.

Références

Littérature scientifique

Articles

Ovesen K. (1962) *Cellular cofferdams, calculations, methods and model tests*, Geoteknisk Institute, bull. n°14, Copenhague

Swatek E.P. (1967) *Cellular cofferdam design and practice*, Journal of the Waterways and Harbours Division, ASCE vol. 93, n°WW3, août, pp. 109-132

Kinney G.F., Wiruth A. D. (1976) *Practical risk analysis for safety management*, NWC Technical publication 5865, Naval Weapons Center, China Lake, Canada

Bustamante M., Gianceselli L. (1981) *Prévision de la capacité portante des pieux isolés sous charge verticale, règles pressiométriques et pénétrométriques*, Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et chaussées, n°113, pp. 83-108

Rossow M.P. (1984) *Sheet interlock tension in cellular cofferdams*, Journal of Geotechnical Engineering, vol. 110, n°10, octobre, pp. 1446-1458

Knott M.A. (1987) *Ship collision with bridges*, Bulletin n°57, AIPCN/PIANC, Bruxelles, Belgique

Goyet J., Bureau A. (1990) *Sécurité probabiliste des structures, évaluation des coefficients partiels de sécurité pour l'élaboration des nouveaux règlements*, Construction métallique n°01-1990, CTICM, Saint-Aubin, France

Calgaro J.A. (1991a) *Introduction à la réglementation technique*, Annales des Ponts et Chaussées n°60, 4^e trimestre 1991

Calgaro J.A. (1991b) *Chocs de bateaux sur les piles de pont*, Annales des Ponts et Chaussées n°59, 3^e trimestre 1991

Vrijling J.K. (1992) *Qu'est-ce qu'un risque acceptable ?* Annales des Ponts et Chaussées n°64, 4^e trimestre 1992

Besse P., Berranger I., Maroini A. (1993) *Méthodologie de calibration des codes semi-probabilistes*, Construction métallique n°2-1993, CTICM, Saint-Aubin, France

Terndrup Pedersen P., Valsgaard S., Olsen D.O., Spangenberg S. (1993) *Ship impact : bow collisions*, Intl Journal of Impact Engineering, vol.13, n°2, pp. 163-187

Vrijling J.K., van Hengel W., Houben R. J. (1995) *A framework for risk evaluation*, Journal of Hazardous Materials 43 (1995), pp 245-261, Elsevier

Goyet J, Jacob B., Lemaire M., Mathieu H. (1998) *Fiabilité des constructions*, Revue française de génie civil, vol. 2, n°5/1998, pp 527-610

Lacroix R. (1998) *Un siècle de réglementation du calcul des ouvrages en béton armé*, Annales du BTP 1998 n°5

Favre J.L. (1998) *Errors in geotechnics and their impact on safety*, Computer and Structures, n°97-1998, Pergamon

Goda Y. (1998) *An overview of coastal engineering with emphasis on random wave approach*, Coastal Engineering Journal, vol. 40, n°1, pp. 1-21

Magnan J.P. (2000) *Quelques spécificités du problème des incertitudes en géotechnique*, Revue française de géotechnique, n°93, 4^e trimestre 2000, pp.3-90

Laurent E. (2006) *Méthodes d'analyse des risques appliqués aux ouvrages d'art*, Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, n°4/2006

Proceedings, Conférences

Buhan P. (de), Dormieux L., Salençon J. (1993) *A theoretical approach to the ultimate limit state design*, Intl Symposium on limit states design in geotechnical engineering, Copenhagen, 26-28 mai 1993, DGF, bulletin n°10

Frank R. (1997) *Some comparisons of safety for axially loaded piles*, Proc. Intl Seminar ERTC3, Bruxelles, Belgique, 17-18 avril 1997, Ed. Balkema, Rotterdam, pp 39-46

Londe, P. (1998) *Evaluation de la stabilité des fondations rocheuses*, Colloque mécanique et géotechnique, 12 mai 1998, Palais du Luxembourg

Oumeraci H. (2000a) *The sustainability challenge in coastal engineering*, Proc. Intl Conference Hydrodynamics ICHD 2000, Yokohama, Japon

Oumeraci H. (2000b) *Probabilistic risk analysis framework for the design of coastal flood defences*, VI^e Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Caen, 17-19 mai 2000

Peyras L., Bonelli S., Royet P. (2000) *Formulation des actions de l'eau dans une méthode semi-probabiliste aux états-limites pour la justification des barrages-poids*, 20^e congrès ICOLD/CIGB, Pékin, Chine

Piet O. (2001) *Le dimensionnement des ouvrages maritimes aux états-limites*, Séminaire de la SHF « Les conditions maritimes extrêmes : prévision, évolution et impacts sur la protection du littoral », 5 juin 2001, Paris, France

Bauduin C. (2003) *Assessment of model factors and reliability index for ULS design of pile foundation*, IVth Conf. on Bored and Auger Piles, Gand, Belgique

Ouvrages

Houy A. (1970), Calcul des ouvrages en palplanches métalliques, Wendel-Sidelot

Ang A.H.S., Tang W.H. (1975) *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*, John Wiley & Sons, New York, USA

Magnan J.C. (1982) *Les méthodes statistiques et probabilistes en mécanique des sols*, Presses des Ponts et Chaussées, Paris, France

Cassan M. (1988) *Les essais in situ en mécanique des sols*, Eyrolles, Paris, France

Larsen O.D. (1993) *Ship collision with bridges : the interaction between vessel traffic and bridge structures*, IABSE, Zurich, Suisse

Dixit A., Pindyck R. (1994) *Investment under Uncertainty*, Princeton University Press, USA

Ditlevsen O., Madsen H.O. (1996) *Structural Reliability Methods*, Wiley & Sons Ltd, Chichester, Royaume-Uni

Calgaro J.A. (1996) *Introduction aux Eurocodes : sécurité des constructions et bases de la théorie de la fiabilité*, Presses des Ponts et Chaussées, Paris, France

Frank R., Bauduin C., Kavvas M., Krebs Ovesen N., Orr T, and Schuppener B. (2004) *Designer's guide to EN 1997-1: Eurocode 7: Geotechnical design – General rules*, Thomas Telford, Londres, Royaume-Uni

Hartford D.N.D., Baecher G.B. (2004) *Risk and Uncertainty in Dam Safety*, Thomas Telford, Londres, Royaume-Uni

Favre J.L. (2004) *Sécurité des ouvrages, risques : modélisation de l'incertain, fiabilité, analyse des risques*, Ed. Ellipses, Paris, France

Quiry P., Vernimmen P., Le Fur Y. (2005) *Corporate Finance: Theory and Practice*, John Wiley & Sons, USA

Allagnat D. (dir.) (2005) *La méthode observationnelle pour le dimensionnement interactif des ouvrages*, Presse des Ponts et Chaussées, Paris, France

Calgaro J.A. (2016) *Éléments de fiabilité des constructions*, Ed. du Moniteur, Paris, France

Archambault V., Popiolek N. (dir.) (2020) *Histoire de sciences & entreprises; vol.4 Séminaire « Favoriser l'impact de la recherche »*, Presse des Mines, Paris, France

Thèses

Corfdir A. (1997) *Analyse de la stabilité d'ouvrages en gabions cellulaires par la théorie du calcul à la rupture*, Thèse de doctorat, ENPC, Paris, France

Delattre L. (1999) *Comportement des écrans de soutènement : expérimentations et calculs*, Thèse de doctorat, ENPC, Marne-la-Vallée, France

Kortenhaus A. (2003) *Probabilistic methods for the breakwaters of the North Sea – Probabilistische Methoden für Nordseedeiche*, Ph.D. thesis, Fachbereich Bauingenieurwesen, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Allemagne

Peyras O. (2003) *Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages*, Thèse de doctorat, Université de Clermont-Ferrand 2, France

Mazas F. (2017) *Extreme meto-oceanic events*, Thèse de doctorat, Université Paris-Est, Marne-la-Vallée, France

Igigabel M. (2022) *Adaptation des systèmes de protection contre les inondations côtières*, Thèse de doctorat, Université Gustave Eiffel, Marne-la-Vallée, France

Littérature professionnelle ou appliquée

Normes et Documents techniques unifiés

(1965) DTU P 06-002 Règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions (dites règles NV 65-67)

(1966) DTU P 225-701 Règles CM - Règles de calcul des constructions en aciers (dites règles CM 66)

(1993) NF E 52-700 Outillage portuaire - Engins de levage et de manutention portuaires sur rails ou fixes - Spécifications techniques

(2003) NF EN 1990 Eurocodes structuraux, bases du calcul des structures

(2005) NF EN 1991-1-4 Eurocode 1 : actions sur les structures - Partie 1-4 : actions générales - Actions du vent

(2005) NF EN 1992-1 Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments

(2005) NF EN 1993-1-1 Eurocode 3 - Calcul des structures en acier - Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments

(2005) NF EN 1997-1 Eurocode 7 : calcul géotechnique - Partie 1 : règles générales

(2006) NF EN 1992-2 Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 2 : ponts en béton - Calcul des dispositions constructives

(2007) NF EN 1991-7 Eurocode 1 - Actions sur les structures - Partie 1-7 : actions générales - Actions accidentelles

(2007) NF EN 1993-2 Eurocode 3 - Calcul des structures en acier - Partie 2 : ponts métalliques

(2013) NF P 94-500 Missions d'ingénierie géotechnique - Classification et spécifications

(2020) XP CEN/TS 17440 Evaluation et rénovation des structures existantes

Règlements français

Ministère de l'équipement (1979) DC79, Directives communes sur le calcul des constructions

Ministère de l'équipement, du logement et des transports (1991) Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites (Fascicule 62, titre 1 du CCTG Travaux)

Ministère de l'équipement, du logement et des transports (1993) Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil (Fascicule 62 titre V du CCTG Travaux)

Codes de calcul étrangers

(1978) Code-modèle CEB-*fip*, Comité euro-international du béton, Lausanne, Suisse

(1995) *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, ACI 318-95, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA

(1996) (actualisant le document de 1990) *EAU, Empfehlungen des Arbeitsausschusses Uferneinfassungen Häfen und Wasserstrassen*, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, Allemagne

(1990) *ROM, Recomendaciones de obras maritimas (maritime works recommendations), 02.90 Actions in the design of maritime and harbour works*, Puertos des Estado, Madrid, Espagne

(2000) BS 6349 Part 1 Maritime structures. General criteria, The British Standards Institution, Londres, Royaume-Uni

(2000) Recommended Practice 2A-WSD (RP 2A-WSD), *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design*, American Petroleum Institute (API), USA

(2016) BS 6349 Part 1-2 Maritime works. General. Code of practice for assessment of actions, The British Standards Institution, Londres, Royaume-Uni

(1991) *Guide specification and commentary for vessel collision design of highway bridges*, Ed. AASHTO, Washington, USA

Rapports

TVA (1957) *Steel Sheet Piling Cellular Cofferdams on Rock*, TVA Technical Monograph 75, vol. 1, Tennessee Valley Authority, Knoxville, Tennessee, USA

Mathieu H. (1975) *Manuel : Sécurité des structures*, Bulletins du Comité européen du béton n° 106 et 107, Ed. CEB, Lausanne, Suisse

Balay J. (1984) *Recommandations pour le choix des paramètres de calcul des écrans de soutènement par la méthode au module de réaction*, Note d'information technique, LCPC, France

Aristaghès, P. (1986) *Conception des quais sur pieux*, Notice STC PM n°86.4, STCPMVN, France

Kunz C. (1990) *Risiko orientierte Last-Konzeption für Schiffsstoss auf Bauwerke*, Mitteilungsblatt des BAW n°97, Darmstadt, Allemagne

PIANC (1993) Analyse des digues à talus en enrochements, rapport CTP II, groupe de travail 12, Bruxelles, Belgique

Sacre C. (1993) *Estimation des vitesses extrêmes du vent en France métropolitaine*, CSTB, rapport EN-CLI 93.9R, France

Coyne et Bellier (1997) *Mise au point d'une méthode semi-probabiliste aux états-limites pour la justification des barrages mobiles en rivière*, Rapport final, STCPMVN, France

Bonnet C., Seidlitz M. (1998) *Coefficients partiels et coefficients de modèle pour les rideaux de soutènement en palplanches*, Rapport d'études et de recherches ER-QG n° 98-05, STCPMVN, France

PIANC (2003) *State-of-the-art of designing and constructing berm breakwaters*, rapport MarCom 40, Bruxelles, Belgique

PIANC (2003) *Breakwaters with vertical and inclined walls*, rapport MarCom 28, Bruxelles, Belgique

Commissariat général du Plan (2005) *Révision du taux d'actualisation des investissements publics*, rapport du groupe d'experts présidé par Daniel Lebègue, rapporteur général Luc Baumstark, La documentation française, Paris, France

CETMEF, CIRIA, CUR (2009) *Guide Enrochements, L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques*, version française du Rock Manual, Ed. Cetmef, Compiègne, France

CFBR (2012) *Recommandations pour la stabilité des barrages-poids*, Comité français des barrages et réservoirs, Le-Bourget-du-Lac, France

CFBR (2015) *Recommandations pour la stabilité des barrages et des digues en remblai*, Comité français des barrages et réservoirs, Le-Bourget-du-Lac, France

PIANC (2015) *Semi-probabilistic design concept for inland hydraulic structures*, rapport InCom 140, Bruxelles, Belgique

PIANC (2016) *Criteria for the selection of breakwater types and their related optimum safety levels*. MarCom report 196, Ed. PIANC, Bruxelles, Belgique

CFBR (2018) *Recommandations provisoires pour la justification du comportement des barrages-voûte*, Comité français des barrages et réservoirs, Le-Bourget-du-Lac, France

EurOtop (2018) *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application*. Van der Meer J.W., Allsop N.W.H., Bruce T., De Rouck J., Kortenhaus A., Pullen T., Schüttrumpf H., Troch P. and Zanuttigh B., www.overtopping-manual.com

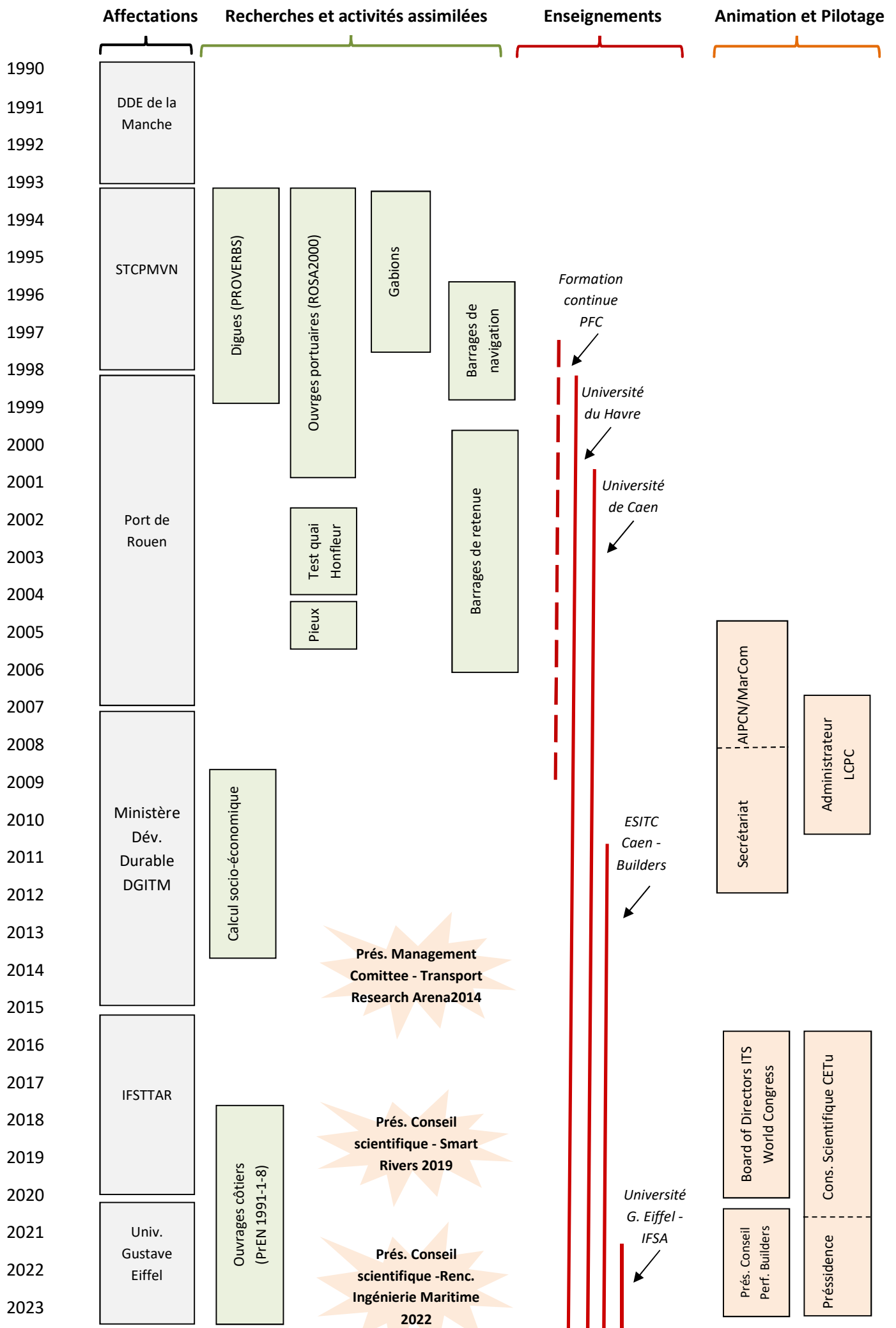
PIANC (2020) *Berthing velocity analysis of seagoing vessels over 30,000 DWT*, rapport MarCom 145, Bruxelles, Belgique

Comité Français de Mécanique des Sols et de géotechnique (2020) *TA 2020 : Règles professionnelles relatives à la conception, au calcul, à l'exécution, au contrôle et à la surveillance des tirants d'ancrage*, France

Fédération nationale des travaux publics (2022) *Recueil de statistiques 2021*, Ed. FNTP, Paris, France

Annexe A CV en frise chronologique

Voir page suivante.



Annexe B Tableau d'analyse des compétences doctorales

Compétence selon le référentiel des études doctorales de Paris Est Sup (cf. annexe I)	Commentaire	Auto-évaluation
Problématiser une question de recherche		
<i>En la situant de manière critique par rapport à l'état de l'art</i>	Cf. toute la section 2.1 (Etat des connaissances), et particulièrement les projets décrits dans les sections 2.2.2 (Valeurs caractéristiques des propriétés des sols) et 2.2.6 (Barrages de navigation)	++
<i>En examinant sa faisabilité scientifique</i>	Cf. les réflexions qui ont préparé les travaux décrits dans les sections 2.2.1 (Gabions) et 2.2.7 (Pieux)	++
<i>En identifiant les lacunes, les failles et les limites</i>	Cf. les expériences développées dans la section 1.5.2 (Pilotage et gouvernance scientifique)	++
<i>En intégrant la globalité et la complexité des phénomènes étudiés</i>	Cf. la complexité décrite dans les sections 1.3.3 (Analyse de risque et notion de risque admissible) et 2.2.3 (Digues verticales) dans le contexte des Eurocodes	+++
<i>En proposant une démarche de recherche planifiée</i>	Cf. toute la section 2.2, et particulièrement l'organisation des projets décrits dans les sections 2.2.5 (Ouvrages portuaires) et 2.2.6 (Barrages de navigation)	++
Développer une démarche inédite		
<i>En créant des savoirs nouveaux et en assurant leur validité</i>	Cf. les nouvelles approches abordées dans les sections 2.2.1 (Gabions) et 2.2.2 (Valeurs caractéristiques des propriétés des sols)	++
<i>En faisant évoluer la problématique et la méthodologie de recherche en fonction de la situation et des moyens dont on dispose</i>	Cf. l'évolution de la problématique décrite dans la section 2.2.3 (Digues verticales) vers celle de la section 2.2.4 (Ouvrages côtiers)	+
<i>En gérant le stress et l'incertitude, en faisant preuve d'autonomie</i>	Cf. toute la partie 1 (Parcours)	+++
<i>En analysant l'impact de son travail de recherche</i>	Cf. le souci constant de diffusion des résultats pour en permettre des applications, section 1.4.2 (Valorisation dans l'univers des normes)	++
<i>En dégagant de nouvelles perspectives</i>	Cf. la prise de recul détaillée dans les sections 1.3 (croisement des approches de l'incertain avec le calcul socio-économique) et 1.6 (Bilan et perspectives vers de futurs travaux)	+
Travailler en collaboration		
<i>En confrontant ses réflexions, ses expériences et ses méthodes avec</i>	Cf. les expériences mentionnées dans les sections 2.2.1 (gabions), 2.2.3 (Digues verticales) et 2.2.7 (Pieux)	+

Compétence selon le référentiel des études doctorales de Paris Est Sup (cf. annexe I)	Commentaire	Auto-évaluation
<i>d'autres chercheurs et doctorants de manière systématique</i>		
<i>En créant ses propres réseaux internationaux et nationaux sur la thématique de son projet de recherche</i>	Cf. les démarches poursuivies dans la durée, décrites dans la section 2.6 (Réseau national et international)	++
<i>En développant des relations de complémentarité avec un large éventail de partenaires et d'organisations</i>	Cf. l'ouverture à de nouveaux partenaires, relatée dans les sections 1.4.1 (Faire le pont entre deux univers scientifiques), 1.5.2 (Pilotage et gouvernance scientifique)	+++
<i>Faire preuve d'une posture scientifique responsable et éthiquement construite</i>		
<i>En mettant en pratique les règles déontologiques du métier de la recherche</i>	Cf. les problématiques et les exemples vécus, partagés dans la section 2.4 (Questionnements éthiques)	++
<i>En conservant un regard critique et une indépendance dans le choix des méthodologies et sur les résultats obtenus</i>	Cf. les épisodes racontés dans la section 2.1.4 (Débats et controverses sur les approches de la sécurité)	++
<i>En garantissant la fiabilité et la validité des nouveaux savoirs</i>	Cf. l'expérience exposée dans la section 2.5.3 (Application sur le terrain)	++
<i>En prenant en compte l'impact de ses recherches sur la société</i>	Cf. la préoccupation de contribuer efficacement à l'amélioration des pratiques de la construction, section 1.4.2 (Valorisation dans l'univers des normes)	+++
<i>Diffuser et partager les nouveaux savoirs</i>		
<i>En maîtrisant les canaux de diffusion (numérique et autres) et leurs conditions d'utilisation</i>	<i>passim</i>	+
<i>En rendant son travail de recherche compréhensible et abordable pour différents publics, spécialisés et non spécialisés</i>	Cf. les sections 1.5.1 (Interventions en universités et écoles d'ingénieurs) et 2.5 (Formation et transfert de connaissances) ; cf. la production scientifique recensée en annexe E, et notamment les communications dans les colloques, les policy briefs et les articles dans les revues professionnelles	++
<i>En explicitant les savoirs inédits dans une relation</i>	Cf. la problématique posée dans la section 1.1.2 (Nécessaire adaptation du format de sécurité)	+

Compétence selon le référentiel des études doctorales de Paris Est Sup (cf. annexe I)	Commentaire	Auto-évaluation
<i>de complémentarité avec les savoirs concurrents</i>		
Faire évoluer son projet professionnel		
<i>En connaissant ses propres ambitions et en cherchant un parcours adapté</i>	Cf. l'introduction du présent mémoire (Enjeux et motivations)	+++
<i>En confrontant ses réflexions avec d'autres chercheurs et professionnels</i>	Cf. les échanges avec les collègues à compter notamment de mon arrivée à l'Ifsttar en 2015	++
<i>En sachant expliciter l'évolution et la transférabilité de ses propres compétences</i>	Cf. la section 1.6 (Bilan et perspectives) et la conclusion du présent mémoire en 3.2	++

Annexe C Encadrements

Nom	Etablissement	Niveau	Durée	Année	Sujet	Pourcentage d'encadrement assuré
Arnaud POINTHIÈRE	Université du Havre	Stage DESS	4 mois	1995	Prise en compte du vent sur l'outillage portuaire : une étude comparative	80 % (co-encadrement avec Jacques BIÉTRY, CSTB)
Laurent LORIOL	Université du Havre	Stage DESS	4 mois	1995	Etude des charges de stockage sur les terminaux à conteneurs du port du Havre	100%
Magali SEIDLITZ	Ecole nationale supérieure de Géologie de Nancy	TFE	4 mois	1996	Calage des coefficients partiels pour les soutènements souples en domaine portuaire	80% (co-encadrement avec Françoise HOMAND, ENSG Nancy)
Cyril JEAN	Université du Havre	Stage DESS	4 mois	1996	Etude comparative des efforts dus aux outillages portuaires	100%

François BROCVIELLE	Université du Havre	Stage DESS	4 mois	1996	Etude comparative des actions portuaires dues aux navires	100%
Jérôme LAIR	Université Blaise Pascal, CUST (Polytech Clermont-Ferrand)	Stage DEA	5 mois	1996	Traitement statistique des charges d'exploitation des terminaux à conteneurs	50% (co-encadrement avec Bernard JACOB, LCPC)
Aude MALIGE	Ecole nationale supérieure des travaux publics de l'Etat	TFE	4 mois	1997	Variabilité du comportement des défenses d'accostage	100%
Cyril BONNET	Ecole Nationale Supérieure des Mines de Nancy	TFE	6 mois	1997	Coefficients partiels et coefficients de modèle pour les rideaux de soutènement en palplanches	80% (co-encadrement avec Edouard LONGAYGUE, STCPMVN)
Jérôme MARCHAIS	CNAM	Mémoire CNMA	6 mois	1997	Calage des coefficients de sécurité partiels pour les quais-poids portuaires	50% (co-encadrement avec Roland BOUTIN, STTIM)
Stéphanie LINGLIN	INSA de Lyon	Stage 4 ^e année	3 mois	1997	Dimensionnement aux états-limites de ducs d'Albe d'accostage et d'amarrage	100%
Stéphanie LINGLIN	INSA de Lyon	TFE	5 mois	1998	Méthodes statistiques pour la détermination des valeurs représentatives des propriétés des sols	50% (co-encadrement avec Richard KASTNER, INSA Lyon, et François BAGUELIN, Fondaconcept)
Rodolphe MANSANDRE	Université de Nantes	Stage DEA	4 mois	1998	Prise en compte semi-probabiliste des pressions hydrostatiques sur les ouvrages portuaires	50% (co-encadrement avec André GROVEL, université de Nantes)
Christian BARBOT	Université Blaise Pascal, CUST (Polytech	TFE	4 mois	1998	Statistique des niveaux marins extrêmes bas le	50% (co-encadrement avec Bernard SIMON, SHOM)

	Clermont-Ferrand)				long des côtes de France	
Stéphanie LASQUELLEC	INSA de Rennes	TFE	4 mois	1998	Chocs de bateaux contre les obstacles	100%

Annexe D Enseignements

Etablissement	Niveau	Intitulé du cours	Volume horaire annuel	Effectif étudiant	Début	Fin
Université Gustave Eiffel, Institut francilien des sciences appliquées (IFSA)	M2 Ingénierie de projet en génie civil (IPGC)	Fiabilité des ouvrages et Eurocodes	7,5 h eTD	Une trentaine	2021	En cours
Builders Ecole d'ingénieurs	Module commun à la 5 ^e année spécialité Ouvrages maritimes et fluviaux & au Mastère Spécialisé Smart Port and Marine Environment Management	Maritime Regulations and Standards	13,5 h eTD	Une vingtaine	2011	En cours
Université de Caen	M2 Ingénierie et géosciences du littoral (IGL)	Ouvrages côtiers	9 h eTD	Une vingtaine	2001	En cours
Université du Havre	M2 Génie portuaire et côtier et développement durable (GPC DD)	Normes de calcul en site aquatique	12,5 h eTD	Une trentaine	1998	En cours
Ponts-Formation-Conseil	Formation continue	Géotechnique des travaux maritimes	3 h / session, une session tous les deux ans environ	Une vingtaine	1995	2001

Annexe E Production scientifique

Ouvrages collectifs

- [1] (1997) *Guide du chef de projet de construction de barrage mobile en rivière*, Ed. du Moniteur, 274 p.
- [2] (1999) *PROVERBS : Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters*. MAS3 – CT95 – 0041, edited by H. Oumeraci, N.W.H. Allsop, M.B. de Groot, R.S. Crouch, J.K. Vrijling, 402 p. (vol.1), 380 p. (vol. 2a), 301 p. (vol.2b), 151 p. (vol. 2c), 180 p. (vol. 2d)
- [3] (2001) *ROSA 2000 : Recommandations pour le calcul aux états-limites des ouvrages en site aquatique*, Ed. Ponts-Formation-Conseil, CD ROM équivalent 2 000 p.
- [4] (2001) *Problems of collisions due to the presence of bridges*, InCom, report WG19, Ed. AIPCN/PIANC, 44 p.
- [5] (2002) *Justification des barrages-poids, synthèse des principales recommandations et état de la pratique des méthodes déterministes, développement d'une méthode semi-probabiliste aux états-limites, faisabilité de la calibration de la méthode semi-probabiliste sur les pratiques actuelles*, rapport du groupe de travail, Comité Français des Grands Barrages, 83 p.
- [6] (2005) *Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages-poids : recommandations provisoires*, Comité Français des Barrages et Réservoirs, 62 p.
- [7] (en cours de publication) *Revised background to EN 1991-1-8 Safety Levels*, CEN/TC 250/SC 1/WG 6 N 241, 54 p
- [8] (en cours d'élaboration) *Manuel Rosa*

Articles dans des revues à comité de lecture

- [9] Kovarik J.B. (1998) *De l'application des Eurocodes aux ouvrages maritimes et fluviaux*, Revue française de génie civil, vol.2 – n°5/1998, Hermès, pp. 611-636
- [10] Linglin S., Longaygue E., Ropert F., Kovarik J.B. (1998) *Détermination de la contrainte de référence sous une fondation superficielle*, Annales du Bâtiment et des Travaux Publics n°5/98, Ed. Eska, pp. 49-70
- [11] Baguelin F., Kovarik J.B. (2000) *Une méthode de détermination des valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques*, Revue française de géotechnique n° 93, pp.35-41
- [12] Kovarik J.B. (2000) *Qu'est-ce qu'un coefficient de sécurité en génie civil ?* Revue française de génie civil, vol.4 – n°6/2000, Hermès, pp. 607-651
- [13] Kovarik J.B. (2002) *Eurocodes et infrastructures en site aquatique*, Annales des Ponts et Chaussées n°102, pp.61-37
- [14] Le Moine M., Kovarik J.B., Piet O. (2003) *Recommandations pour le calcul aux états-limites des ouvrages en site aquatique*, Revue française de génie civil, n°7/2003 Génie côtier, Hermès, pp. 1211-1230

[15] Frank R., Kovarik J.B. (2005) *Comparaison des niveaux de sécurité, calage d'un coefficient de modèle pour la résistance ultime des pieux sous charges axiales*, Revue française de géotechnique n° 110, pp.51-67

[16] Peyras L., Kovarik J.B., Royet P. (2006) *Vers l'adaptation aux Eurocodes de la justification des barrages poids*, Revue européenne de génie civil, vol.10 – n°1/2006, Hermès, pp. 83-109

[17] Peyras L., Roye P., Deroo L., Albert R., Becue J.P., Aigouy S., Bourdarot E., Loudière D. Kovarik J.B. (2008) *French Recommendations for the Analytical Review of Gravity Dam Stability*, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 19 p.

[18] Schmidt F., lentile S., Godart B., Kovarik J.B. (2023) *Analyse statistique de la capacité portante d'un quai de port maritime*, JFMS 2023, Academic Journal of Civil Engineering, vol.41 (3) (accepté pour publication)

Communications dans des colloques

[19] Kovarik J.B. (1995) *Risk analysis for barge collision with bridges*, Conférence ICASP 7, 10-13 juillet 1995, Paris, France, Ed. M. Lemaire, J.L. Favre, A. Mebarki, Balkema/Rotterdam/Brookfield/1995, pp. 693-700

[20] Kovarik J.B. (1998) *La vérification des ouvrages maritimes aux états-limites*, V^e Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, 13-15 mai 1998, Toulon, France Ed. Paralia

[21] Kovarik J.B. (1998) *La vérification des ouvrages maritimes aux états-limites*, 29^e congrès international AIPCN/PIANC, 6-11 septembre 1998, La Haye, Pays-Bas

[22] Kovarik J.B. (1998) *Méthodes de calage des coefficients de modèle pour les ouvrages maritimes et fluviaux*, 2^e conférence nationale JN-FIAB'98, 23-24 novembre 1998, université de Marne-la-Vallée, France, Ed. Hermès, pp. 29-38

[23] Lasquelles S., Cornet J.M., Kovarik J.B. (1998) *Un modèle probabiliste pour les chocs de bateaux contre les piles de pont*, 2^e conférence nationale JN-FIAB'98, 23-24 novembre 1998, université de Marne-la-Vallée, France, Ed. Hermès, pp. 125-135

[24] Kovarik J.B. (1999) *Guidelines for limit states design of harbour and waterways structures*, International conference Coastal Structures '99, 7- 10 June 1999, Santander, Espagne, Ed. Inigo J. Losada, Balkema/Rotterdam/Brookfield/2000, pp. 1107-1113

[25] Mathieu H., Chaussin R., Kovarik J.B. (2000) *Risque et réglementation*, Colloque « Risque et génie civil », 8-9 novembre 2000, Paris, France, Presses de l'ENPC, pp. 41-55

[26] Kovarik J.B. (2000) *Définir un coefficient de sécurité*, Colloque « Risque et génie civil », 8-9 novembre 2000, Paris, France, Presses de l'ENPC, pp. 57-75

[27] Piet O., Kovarik J.B., Le Moine M. (2002) *ROSA 2000 : les recommandations pour le calcul aux états-limites des ouvrages en site aquatique*, VII^e Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, 15-17 mai 2002, Anglet, France, Ed. Paralia, pp. 463 à 470

[28] Baguelin F., Sigros B., Derrien P., Kovarik J.B., Legros D. (2004) *L'application des Eurocodes au dimensionnement d'un quai sur pieux : le retour d'expérience*, Colloque « Les risques en génie civil », 18-19 mars 2004, Hammamet, ISET de Sfax, Tunisie

[29] Baguelin F., Sigros B., Derrien P., Kovarik J.B., Legros D. (2004) *ROSA 2000 utilisé avec succès à un quai sur pieux*, VIII^e Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, 7-9 septembre 2004, Compiègne, France, Ed. Paralia

[30] Kovarik J.B., Ropert F., Hafid A. (2023) *Addressing Hydraulic Limit States of Coastal Structures within Eurocode safety format*, ICE Coasts, Marine Structures and Breakwaters conference, 25-27 avril 2023, Portsmouth, Royaume-Uni

[31] Kovarik J.B., Hamm L., Ropert F., Bonnemaire B. (2023) *Caractériser les actions météo-océaniques sur des durées longues avec le format des Eurocodes*, MedDays AIPCN/PIANC, 25-27 octobre 2023, Sète, France (accepté pour présentation)

Policy briefs

[32] Evans C., Halimatussadhia A., Kovarik J.B. (coord.), Mendoza J.F., Palhol F., Pasquali F., Riefky T., Starnes M., Sofiyandi Y., Syabri I., Wicaksono T. (2021) *Maintaining Resilient Infrastructure Systems*, Ed. ISPI for T20 Italy, 22 p.

[33] Long C. (coord.), Aguilera A., Antonialli F., Cohen J.C., Fourcadet O., Gache Ph., Hsu E., Kortum K., Lenz B., Kovarik J.B., Raux Ch., Salat S., Zmud J. (2020) *Defining the role of automated transportation infrastructure in shaping sociotechnical systems*, Ed. "t20saudiarabia.org.sa" for T20 Saudi Arabia, 22 p.

[34] Evans C., Godart B., Kovarik J.B. (coord.), Mendoza J.F., Palhol F., Starnes M. (2020) *Evaluating Resilient Infrastructure Systems*, Ed. "t20saudiarabia.org.sa" for T20 Saudi Arabia, 28 p.

[35] Kovarik J.B. (coord.), Villareal A., Alferaiheedi Y., Arriaga Ramos E., Modiselle K.G. (2020) *Carbon-neutral Buildings and Recycled Materials: How Cities Want to Solve the Challenge*, Ed. "@Urban20Riyadh" for U20 Saudi Arabia, 42 p.

[36] Evans C., Godart B., Krieger J., Kovarik J.B. (coord.), Mimram M., Palhol F. (2020) *Building Resilient Infrastructure Systems*, in *Building the Future of Quality Infrastructure*, Ed. ABDInstitute, Tokyo, for T20 Japan, pp. 41-52

Articles dans des revues sans comité de lecture

[37] Kovarik J.B. (1999) *La vérification des ouvrages maritimes aux états-limites*, Bulletin n°100, AIPCN/PIANC, Bruxelles, Belgique, pp. 35-39

[38] Barbot C., Simon B., Allain S., Kovarik J.B. (1999) *La détermination des niveaux marins extrêmes le long des côtes de France*, Bulletin n°102, AIPCN/PIANC, Bruxelles, Belgique, pp. 27-35

Articles dans les revues professionnelles et autres productions

[39] Scherrer P., Galichon P., Kovarik J.B., Delouis A., Lerat F., Hamm L. (2002) *Port 2000 - Combining a port development scheme and an environmental project to begin rehabilitating the Seine estuary :*

towards global management, 30^e congrès international AIPCN/PIANC, septembre 2002, Sydney, Australie

[40] Kovarik J.B (2003) *Le dragage face aux exigences de sécurité et de protection de l'environnement*, 3^{ème} conférence portuaire panafricaine APCP/IAPH, 09-11 décembre 2003, Douala, Cameroun

[41] Menguy E., Kovarik J.B., Leprince M. (2004) *La création de l'espace des Marégraphes à Rouen*, 9^{ème} Conférence internationale Villes & Ports, AIVP, 05-09 juillet 2004, Lisbonne, Portugal

[42] Farnole P., Delouis A., Kovarik J.B. (2006) *Restoration of embankments in the Seine river estuary : a newly achieved balance between ecology and navigation*, 7th International Conference on the Environmental Management of Enclosed Coastal Seas (EMECS 7 / ESCA 40), mai 2006, Caen, France

[43] Kovarik J.B. (2008) *Le transport fluvial à l'heure des choix*, Annales 2008 de l'Institut méditerranéen des transports maritimes (IMTM)

[44] Kovarik J.B., Soubaras H. (2009) *Une mesure de l'entropie des fonctions de croyance par une méthode issue de la physique statistique*, Rencontres francophones sur la logique floue et ses applications (LFA), 5 et 6 novembre 2009, Annecy, France, Cepadues Editions

[45] Kovarik J.B. (2013) *La politique portuaire en France*, 3^e Journées Méditerranéennes du Génie Côtier et Portuaire AIPCN/PIANC, 22-24 mai 2013, Marseille, France

[46] Kovarik J.B., Samri D. (2017) *ITS4Climate initiative*, 12th ITS European Congress, 19-22 juin 2017, Strasbourg, France

Normes, textes réglementaires, rapports reprenant des éléments issus de mes travaux de recherche

[47] (1998) Amélioration de la conception et du dimensionnement des gabions de palplanches métalliques, rapport de recherche, STCPMVN, ENPC/CERCISO, ProfilArbed-ISPC, Bureau Veritas, 276 p

[48] (2007) NF EN 1993-1-5, *Calcul des structures en acier, plaques planes*, AFNOR

[49] (2007) NF P 94-282, *Écrans*, AFNOR

[50] (2011) Le calcul du risque dans les investissements publics, rapport de la commission présidée par Christian Gollier, Centre d'analyse stratégique - rapport n°2011-36, La Documentation française, 240 p.

[51] (2012) NF P 94-262, *Fondations profondes*, AFNOR

[52] (2013) NF P 94-261, *Fondations superficielles*, AFNOR

[53] (2014) NF P 94-281, *Murs*, AFNOR

[54] (2014) Ministère de la transition écologique, Instruction du Gouvernement du 16 juin 2014 relative à l'évaluation des projets de transport

[55] (2018) Ministère de la transition écologique, Arrêté du 6 août 2018 fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages

[56] (2020) NF P 94-270, *Sols renforcés*, AFNOR

[57] (mise à l'enquête publique en 2023) prEN 1991-1-8, *Actions de la houle et du courant sur les structures côtières*, AFNOR

Annexe F Participation à des jurys de thèse

(1997) Alain Corfdir, *Analyse de la stabilité d'ouvrages en gabions cellulaires par la théorie du calcul à la rupture*. Thèse de doctorat en sciences et techniques, soutenue le 7 mars 1997 à l'ENPC, sous la direction de P. de Buhan, jury présidé par J. Salençon

(2008) Charles Lopez, *Le transport fluvio-maritime, quelle pertinence socio-économique pour le bassin Rhône-Saône ?* Thèse de doctorat en sciences économiques, économie des transports, soutenue le 17 mars 2008, au LET, Lyon 2, sous la direction d'Y Crozet

(2011) Florian Vanco, *Formes urbaines et durabilité du système de transports. : Une application par les coûts de la mobilité urbaine des ménages sur l'agglomération lyonnaise*. Thèse de doctorat en sciences économiques soutenue le 14 avril 2011, au LET, Lyon 2, sous la direction de D. Mignot, jury présidé par Y. Crozet

Annexe G Conférence invitée

(2005) *L'application des Eurocodes à un ouvrage portuaire : le retour d'expérience*, 4ème conférence nationale de fiabilité des matériaux et des structures JNF'05, 25-26 octobre 2005, université de Clermont-Ferrand, France

Annexe H Arrêté du 22 février 2019 définissant les compétences des diplômés du doctorat

6 mars 2019

JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Texte 21 sur 113

Décrets, arrêtés, circulaires

TEXTES GÉNÉRAUX

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR, DE LA RECHERCHE ET DE L'INNOVATION

Arrêté du 22 février 2019 définissant les compétences des diplômés du doctorat et inscrivant le doctorat au répertoire national de la certification professionnelle

NOR : ESRS1901898A

La ministre de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation,

Vu la recommandation du Conseil européen du 22 mai 2017 concernant le cadre européen des certifications pour l'apprentissage tout au long de la vie ;

Vu le code de l'éducation, notamment son article L. 613-1 ;

Vu le code du travail, notamment ses articles L. 6113-1, D. 6113-34 et D. 6113-35 ;

Vu l'arrêté du 22 janvier 2014 fixant les modalités d'accréditation d'établissements d'enseignement supérieur ;

Vu l'avis du Conseil national de l'enseignement supérieur et de la recherche en date du 20 décembre 2018,

Arrête :

Art. 1^{er}. – Le doctorat est enregistré au répertoire national des certifications professionnelles.

Il est classé au niveau 8 du cadre national de certification défini à l'article D. 6113-34 du code du travail et issu de la recommandation du Conseil européen du 22 mai 2017 susvisée.

Art. 2. – La délivrance du doctorat certifie la capacité à produire des connaissances scientifiques nouvelles de haut niveau ainsi que l'acquisition et la maîtrise de blocs de compétences communs à l'ensemble des docteurs et liés à leur formation par la recherche.

Dans l'objectif de favoriser le recrutement des docteurs par les employeurs des secteurs de la production et des services, ces blocs de compétences sont définis dans l'annexe du présent arrêté.

Art. 3. – L'arrêté d'accréditation de chaque établissement se réfère pour le doctorat aux domaines d'activités professionnelles mentionnés à l'article L. 6113-1 du code du travail.

Art. 4. – La directrice générale de l'enseignement supérieur et de l'insertion professionnelle est chargée de l'exécution du présent arrêté, qui sera publié au *Journal officiel* de la République française.

Fait le 22 février 2019.

FRÉDÉRIQUE VIDAL

ANNEXE

COMPÉTENCES OU CAPACITÉS ÉVALUÉES

Bloc 1

Conception et élaboration d'une démarche de recherche et développement, d'études et prospective

- disposer d'une expertise scientifique tant générale que spécifique d'un domaine de recherche et de travail déterminé ;
- faire le point sur l'état et les limites des savoirs au sein d'un secteur d'activité déterminé, aux échelles locale, nationale et internationale ;
- identifier et résoudre des problèmes complexes et nouveaux impliquant une pluralité de domaines, en mobilisant les connaissances et les savoir-faire les plus avancés ;
- identifier les possibilités de ruptures conceptuelles et concevoir des axes d'innovation pour un secteur professionnel ;
- apporter des contributions novatrices dans le cadre d'échanges de haut niveau, et dans des contextes internationaux ;
- s'adapter en permanence aux nécessités de recherche et d'innovation au sein d'un secteur professionnel.

Bloc 2**Mise en œuvre d'une démarche de recherche et développement,
d'études et prospective**

- mettre en œuvre les méthodes et les outils de la recherche en lien avec l'innovation ;
- mettre en œuvre les principes, outils et démarches d'évaluation des coûts et de financement d'une démarche d'innovation ou de R&D ;
- garantir la validité des travaux ainsi que leur déontologie et leur confidentialité en mettant en œuvre les dispositifs de contrôle adaptés ;
- gérer les contraintes temporelles des activités d'études, d'innovation ou de R&D ;
- mettre en œuvre les facteurs d'engagement, de gestion des risques et d'autonomie nécessaire à la finalisation d'un projet R&D, d'études ou d'innovation.

Bloc 3**Valorisation et transfert des résultats d'une démarche R&D,
d'études et prospective**

- mettre en œuvre les problématiques de transfert à des fins d'exploitation et valorisation des résultats ou des produits dans des secteurs économiques ou sociaux ;
- respecter les règles de propriété intellectuelle ou industrielle liées à un secteur ;
- respecter les principes de déontologie et d'éthique en relation avec l'intégrité des travaux et les impacts potentiels ;
- mettre en œuvre l'ensemble des dispositifs de publication à l'échelle internationale permettant de valoriser les savoirs et connaissances nouvelles ;
- mobiliser les techniques de communication de données en « open data » pour valoriser des démarches et résultats.

Bloc 4**Veille scientifique et technologique à l'échelle internationale**

- acquérir, synthétiser et analyser les données et informations scientifiques et technologiques d'avant-garde à l'échelle internationale ;
- disposer d'une compréhension, d'un recul et d'un regard critique sur l'ensemble des informations de pointe disponibles ;
- dépasser les frontières des données et du savoir disponibles par croisement avec différents champs de la connaissance ou autres secteurs professionnels ;
- développer des réseaux de coopération scientifiques et professionnels à l'échelle internationale ;
- disposer de la curiosité, de l'adaptabilité et de l'ouverture nécessaire pour se former et entretenir une culture générale et internationale de haut niveau.

Bloc 5**Formation et diffusion de la culture scientifique et technique**

- rendre compte et communiquer en plusieurs langues des travaux à caractère scientifique et technologique en direction de publics ou publications différents, à l'écrit comme à l'oral ;
- enseigner et former des publics diversifiés à des concepts, outils et méthodes avancés ;
- s'adapter à un public varié pour communiquer et promouvoir des concepts et démarches d'avant-garde.

Bloc 6**Encadrement d'équipes dédiées à des activités de recherche
et développement, d'études et prospective**

- animer et coordonner une équipe dans le cadre de tâches complexes ou interdisciplinaires ;
- repérer les compétences manquantes au sein d'une équipe et participer au recrutement ou à la sollicitation de prestataires ;
- construire les démarches nécessaires pour impulser l'esprit d'entrepreneuriat au sein d'une équipe ;
- identifier les ressources clés pour une équipe et préparer les évolutions en termes de formation et de développement personnel ;
- évaluer le travail des personnes et de l'équipe vis à vis des projets et objectifs.

Annexe I Référentiel compétences des études doctorales de l'Université Paris-Est (Paris-Est Sup)



