



UNIVERSITÉ
Clermont Auvergne

Master Génie Civil
Université Clermont-Auvergne
École Universitaire de Physique et d'Ingénierie
Polytech Clermont-Ferrand
Département de Génie Civil



MÉMOIRE DE MASTER

Présenté par

Fares FRIKHA

Pour l'obtention du

MASTER 2 EN GÉNIE CIVIL

Développement et validation des outils de calcul destinés au dimensionnement de structures

Réalisé à : Société EKIUM



Soutenu le 02/09/2022, devant le jury :

Membre jury :

Mme. Florence LABESSE

Membre jury :

M. Claude Feldman PAMBOU NZIENGUI

Encadrant EUPI :

M. Rostand MOUTOU-PITTI

Encadrant société :

M. Samir DJEGHIMA

Remerciements

Je tiens à remercier dans un premier temps le bon Dieu de m'avoir donné la force et la patience tout au long de ce projet.

*Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à **M. Samir DJEGHIMA**, ses compétences, ses rigueurs scientifiques et ses clairvoyances m'ont beaucoup appris. Il a été et restera un moteur de ce travail.*

*Je tiens à remercier mes collègues au service génie civil de la BE nucléaire **M. Sofian Battach** et **M. Abdoulaye BAH** pour leur accueil, leurs conseils et la bonne ambiance durant toute la période du stage.*

*Aussi, je remercie **M. Pierre COLOMBEL** directeur des Ressources Humaines de la société EKIUM qui m'a donné l'opportunité d'intégrer l'entreprise et **M. Rostand MOUTOU-PITTI** mon tuteur.*

Je remercie finalement le cadre enseignant de l'École Universitaire de Physique et d'Ingénierie et particulièrement les responsables du département de Génie Civil ainsi que les professeurs qui ont contribué à ma formation.

Résumé

Cette mémoire de master vise à développer et valider des outils de calcul destinés au dimensionnement de structures, à savoir les poutres, les poteaux, les plaques, les coques et les fondations.

Pour atteindre cet objectif, le travail a commencé par choisir et étudier les normes et les règlements à utiliser. Ensuite, on entame le développement des outils. Il y en a quatre outils : un outil pour le calcul du ferraillage des poutres et des poteaux en béton armé, un outil pour le calcul du ferraillage des plaques et des coques en béton armé aussi, un outil pour le dimensionnement des fondations superficielles et un outil pour le dimensionnement des fondations profondes. L'élaboration d'un outil est finalisée après la phase de validation, qui consiste à la comparaison des résultats obtenus par ces outils avec celles obtenus par des logiciels de référence.

L'objectif est de développer des outils faciles à utiliser et adaptés aux besoins de l'entreprise selon les normes les plus appropriées.

Abstract

This master thesis aims to develop and validate calculation tools for the design of structures, namely beams, columns, plates, shells and foundations.

To achieve this objective, the work began by selecting and studying the standards and regulations to be used. Then the development of the tools is started. There are four tools : a tool for the calculation of the reinforcement of reinforced concrete beams and columns, a tool for the calculation of the reinforcement of reinforced concrete plates and shells, a tool for the dimensioning of shallow foundations and a tool for the dimensioning of deep foundations. The development of a tool is finalized after the validation phase, which involve comparing the results obtained by these tools with those obtained by reference software.

The aim is to develop tools that are easy to use and adapted to the needs of the company according to the most appropriate standards.

Table des matières

Introduction générale	1
1 Présentation de l'entreprise	2
1.1 Introduction	3
1.2 Présentation générale de l'entreprise	3
1.3 Activités de l'entreprise	4
1.4 Chiffre d'affaires de l'entreprise	4
1.5 Clients de l'entreprise	5
1.6 Conclusion	5
2 Présentation du stage	6
2.1 Introduction	7
2.2 Présentation des tâches	7
2.3 Normes et règlements de calcul	8
2.3.1 BAEL 91 révisé 99 [2]	8
2.3.2 NF EN 1992-1-1 [3]	8
2.3.3 RCC-CW [4]	8
2.3.4 NF P 94-261 [5]	8
2.3.5 NF P 94-262 [6]	9
2.3.6 NF EN 1998-5 [7]	9
2.4 Logiciels utilisés	9
2.4.1 Ansys APDL [8]	9
2.4.2 Python [9]	12
2.4.3 PTC Mathcad [11]	13
2.5 Conclusion	14
3 EKbeam	15
3.1 Introduction	16
3.2 Description de l'outil	16
3.3 Objet de l'outil	16

3.4	Fonctionnement de l'outil	17
3.4.1	Fichiers de données	17
3.4.2	Fichier de combinaisons	19
3.4.3	Fichier de résultats	20
3.4.4	Fichier de récapitulation des données	21
3.4.5	Message d'erreur	22
3.5	Méthode de calcul	22
3.5.1	Efforts	22
3.5.2	Calcul béton armé	23
3.5.3	Calcul des armatures	25
3.6	Tests de validation	37
3.6.1	Déroulement des tests de validation	37
3.6.2	Grille des tests de validation	37
3.6.3	Validaion des tests	38
3.7	Exemple de calcul	39
3.8	Conclusion	39
4	EKfer	40
4.1	Introduction	41
4.2	Description de l'outil	41
4.3	Objet de l'outil	41
4.4	Fonctionnement de l'outil	41
4.4.1	Fichiers de données	42
4.4.2	Fichier de combinaisons	42
4.4.3	Fichier de résultats	43
4.4.4	Fichier de récapitulation des données	44
4.4.5	Message d'erreur	44
4.5	Méthode de calcul	44
4.5.1	Efforts	45
4.5.2	Calcul béton armé	46
4.5.3	Calcul des armatures	46
4.6	Tests de validation	47

4.6.1	Déroulement des tests de validation	47
4.6.2	Grille des tests de validation	47
4.6.3	Validaion des tests	48
4.7	Exemple de calcul	48
4.8	Conclusion	48
5	EKfond	49
5.1	Introduction	50
5.2	Description de l'outil	50
5.3	Objet de l'outil	50
5.4	Fonctionnement de l'outil	50
5.4.1	Fichiers de données	51
5.4.2	Fichiers des résultats	54
5.5	Méthode de calcul	60
5.5.1	Calcul de la capacité portante	60
5.5.2	Procédure « modèle de terrain »	62
5.5.3	Procédure « modèle de pieu »	64
5.5.4	Vérification du béton	68
5.6	Tests de validation	69
5.6.1	Déroulement des tests de validation	69
5.6.2	Grille de test de validation	69
5.6.3	Validaion des tests	71
5.7	Conclusion	71
6	EKfielle	72
6.1	Introduction	73
6.2	Description de l'outil	73
6.3	Objet de l'outil	73
6.4	Fonctionnement de l'outil	74
6.4.1	Fichiers de données	74
6.4.2	Fichiers des résultats	81
6.5	Méthode de calcul	85

6.5.1	Calcul de la capacité portante	85
6.5.2	Vérification du glissement	89
6.5.3	Vérification de l'excentricité	90
6.5.4	Vérification du soulèvement	90
6.5.5	Calcul du tassement	91
6.5.6	Vérification de la portance vis-à-vis au séisme	92
6.5.7	Calcul ferraillage	93
6.6	Tests de validation	93
6.7	Exemple de calcul	93
6.8	Conclusion	94
Conclusion générale		95
Bibliographie		96
7 Annexes		97
7.1	Annexe 1 : EKbeam	98
7.1.1	Exemple de calcul	98
7.1.2	Validation des test	103
7.2	Annexe 2 : EKfer	112
7.2.1	Exemple de calcul	112
7.2.2	Validation des test	117
7.3	Annexe 3 : EKfond	118
7.3.1	Exemple de calcul	118
7.3.2	Validation des test	123
7.4	Annexe 4 : EKfielle	138
7.4.1	Exemple de calcul	138

Table des figures

1.1	Historique d'EKIUM [1]	3
1.2	Implantations d'EKIUM [1]	3
1.3	Activités d'EKIUM [1]	4
1.4	Chiffre d'affaires d'EKIUM [1]	4
1.5	Clients d'EKIUM [1]	5
3.1	Forme du fichier de données « <i>fic.don</i> »	17
3.2	Forme du fichier de données « <i>comb_i</i> »	20
3.3	Forme du fichier de résultats « <i>Résultat de calcul</i> »	20
3.4	Forme du fichier de récapitulation « <i>Récapitulation des données</i> »	21
3.5	Forme du message d'erreur	22
3.6	Diagramme parabole rectangle contrainte - déformation du béton [13]	23
3.7	Diagramme rectangulaire simplifié contrainte - déformation du béton [13]	23
3.8	Diagramme contrainte - déformation de l'acier [13]	23
3.9	Diagramme des déformations limites de la section - règle des trois pivots [13]	24
3.10	Équilibre d'une section rectangulaire en béton armé à l'ELU	24
3.11	Équilibre d'une section rectangulaire en béton armé à l'ELS	24
3.12	Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELU et l'ELA	27
3.13	Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELU et l'ELA - cas 1 . .	27
3.14	Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELU et l'ELA - cas 2 . .	28
3.15	Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELU et l'ELA - cas 3 . .	28
3.16	Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELU et l'ELA - cas 4 . .	28
3.17	Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELU et l'ELA - cas 5 . .	29
3.18	Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELU et l'ELA - cas 6 . .	29
3.19	Diagramme de calcul des armatures de traction simple à l'ELU et l'ELA	30
3.20	Diagramme de calcul des armatures de compression simple à l'ELU et l'ELA	30
3.21	Diagramme de calcul des armatures de l'effort tranchant à l'ELU et l'ELA	30
3.22	Diagramme de calcul des armatures de torsion à l'ELU et l'ELA	32
3.23	Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELS	33

3.24 Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELS du cas 1	33
3.25 Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELS du cas 2	34
3.26 Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELS du cas 3	34
3.27 Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELS du cas 4	34
3.28 Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELS du cas 5	35
3.29 Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELS du cas 6	35
3.30 Diagramme de calcul des armatures de traction simple à l'ELS	35
3.31 Diagramme de calcul des armatures de compression simple à l'ELS	36
3.32 Diagramme de calcul des armatures minimales longitudinales	36
3.33 Diagramme de calcul des armatures minimalles transversales	36
4.1 Forme du fichier de données « <i>fic.don</i> »	42
4.2 Forme du fichier de données « <i>comb_i</i> »	42
4.3 Forme du fichier de résultats « <i>Résultat de calcul</i> »	43
4.4 Forme du fichier de récapitulation « <i>Récapitulation des données</i> »	44
4.5 Forme du message d'erreur	44
4.6 Répartition des armatures dans une facette	45
4.7 Facette avec un angle θ par rapport à l'axe Ox	45
4.8 Efforts dans une facette	46
5.1 Forme du fichier de données « <i>Sondage</i> »	51
5.2 Forme du fichier de données « <i>Fondation</i> »	52
5.3 Forme du fichier de données « <i>charge</i> »	54
5.4 Forme du fichier de résultats représentant les charges	55
5.5 Forme du fichier de résultats présentant les résultats de calculs - procédure de terrain	55
5.6 Forme du fichier de résultats présentant les résultats de calculs - procédure de pieu .	57
5.7 Forme du fichier de résultats représentant les vérifications	58
5.8 Diagramme de calcul de la résistance de pointe	61
5.9 Diagramme de calcul de la de frottement axial	61
5.10 Diagramme de la vérification de la contrainte moyenne	68
5.11 Diagramme de la vérification de la contrainte maximale	69
6.1 Forme du fichier de données « <i>Données</i> » pour le cas de la méthode analytique . . .	74

Table des figures

6.2	Forme du fichier de données « <i>Données</i> » pour le cas de la méthode pressiométrique	75
6.3	Forme du fichier de données « <i>Sondage</i> »	76
6.4	Forme du fichier de données « <i>Charges</i> »	77
6.5	Forme du fichier de données « <i>Tassement</i> »	78
6.6	Forme du fichier de données « <i>Séisme</i> » pour le cas du sol purement cohérent	79
6.7	Forme du fichier de données « <i>Séisme</i> » pour le cas du sol purement cohérent	80
6.8	Forme du fichier de données « <i>Ferraillage</i> »	81
6.9	Forme du fichier de résultats représentant les données d'entrée	82
6.10	Forme du fichier de résultats représentant les résultats de calculs pour la méthode analytique	82
6.11	Forme du fichier de résultats représentant les résultats de calculs pour la méthode pressiométrique	83
6.12	Forme du fichier de résultats représentant les tassements	84
6.13	Forme du fichier de résultats représentant les tassements	84
6.14	Forme du fichier de résultats représentant le ferraillage selon DTU	85
6.15	Forme du fichier de résultats représentant le ferraillage selon EC2	85
6.16	Diagramme de calcul de la résistance nette du terrain par la méthode analytique en conditions non drainées	86
6.17	Diagramme de calcul de la résistance nette du terrain par la méthode analytique en conditions drainées	87
6.18	Diagramme de calcul de la résistance nette du terrain par la méthode pressiométrique	88
6.19	Diagramme de calcul de l'épaisseur du terrain	88
6.20	Diagramme de calcul du coefficient de réduction lié à l'inclinaison du chargement . .	89
6.21	Diagramme de calcul du coefficient de réduction lié à la présence d'un talus	89
6.22	Diagramme de vérification du glissement	90
6.23	Diagramme de vérification de l'excentricité	90
6.24	Diagramme de calcul du tassement par la méthode pressiométrique	91
6.25	Diagramme de calcul du ferraillage	93
7.1	Fichier « <i>fic.don</i> » pour le cas de l'exemple étudié	98
7.2	Fichier « <i>Récapitulation des données</i> » pour le cas de l'exemple étudié	99
7.3	Fichier « <i>comb_1</i> » pour le cas de l'exemple étudié	99

Table des figures

7.4 Fichier « <i>Résultats de calcul</i> » pour le cas de l'exemple étudié	100
7.5 Section d'armatures longitudinales supérieures pour le cas de l'exemple étudié	100
7.6 Section d'armatures longitudinales inférieures pour le cas de l'exemple étudié	101
7.7 Section d'armatures transversales d'effort tranchant pour le cas de l'exemple étudié . .	101
7.8 Section d'armatures longitudinales de torsion pour le cas de l'exemple étudié	102
7.9 Section d'armatures transversales de torsion pour le cas de l'exemple étudié	102
7.10 Tableau de résultats affiché dans « <i>ANSYS</i> »	103
7.11 Fichier « <i>fic.don</i> » pour le cas de l'exemple étudié	112
7.12 Fichier « <i>Récapitulation des données</i> » pour le cas de l'exemple étudié	113
7.13 Fichier « <i>comb_1</i> » pour le cas de l'exemple étudié	114
7.14 Fichier « <i>Résultats de calcul</i> » pour le cas de l'exemple étudié	114
7.15 Section d'armatures longitudinales supérieures dans la direction X pour le cas de l'exemple étudié	115
7.16 Section d'armatures longitudinales supérieures dans la direction Y pour le cas de l'exemple étudié	115
7.17 Section d'armatures longitudinales inférieures dans la direction X pour le cas de l'exemple étudié	116
7.18 Section d'armatures longitudinales inférieures dans la direction Y pour le cas de l'exemple étudié	116
7.19 Fichier « <i>Sondages</i> » pour le cas de l'exemple étudié	118
7.20 Fichier « <i>Fondation</i> » pour le cas de l'exemple étudié	118
7.21 Fichier « <i>Charges</i> » pour le cas de l'exemple étudié	118
7.22 Fichier « <i>Résultats de calcul</i> » partie des charges pour le cas de l'exemple étudié . .	119
7.23 Fichier « <i>Résultats de calcul</i> » partie des calculs pour le cas de l'exemple étudié . .	119
7.24 Fichier « <i>Résultats de calcul</i> » partie des vérifications pour le cas de l'exemple étudié	120
7.25 Graphe « <i>Sondage</i> » pour le cas de l'exemple étudié	120
7.26 Graphe « <i>kp</i> » pour le cas de l'exemple étudié	121
7.27 Graphe « <i>alpha,pieu-sol</i> » pour le cas de l'exemple étudié	121
7.28 Graphe « <i>f,sol</i> » pour le cas de l'exemple étudié	122
7.29 Graphe « <i>qs</i> » pour le cas de l'exemple étudié	122
7.30 Graphe « <i>Rs</i> » pour le cas de l'exemple étudié	123

7.31	Graphe « <i>RB</i> » pour le cas de l'exemple étudié	123
7.32	Fichier <i>Données</i> pour le cas de l'exemple étudié	138
7.33	Fichier <i>Sondage</i> pour le cas de l'exemple étudié	138
7.34	Fichier <i>Charges</i> pour le cas de l'exemple étudié	138
7.35	Fichier <i>Tassement</i> pour le cas de l'exemple étudié	139
7.36	Fichier <i>Séisme</i> pour le cas de l'exemple étudié	139
7.37	Fichier <i>Ferraillage</i> pour le cas de l'exemple étudié	139
7.38	Fichier « <i>Résultats de calcul</i> » partie des données pour le cas de l'exemple étudié	139
7.39	Fichier « <i>Résultats de calcul</i> » partie des calculs pour le cas de l'exemple étudié	140
7.40	Fichier « <i>Résultats de calcul</i> » partie des tassements pour le cas de l'exemple étudié .	140
7.41	Fichier « <i>Résultats de calcul</i> » partie des ferraillage pour le cas de l'exemple étudié .	140

Liste des tableaux

3.1	Paramètres de calcul	25
3.2	Détermination des pivots [13]	26
3.3	Grille des tests de validation	37
5.1	Valeurs des facteurs γ_b et γ_s [6]	63
5.2	Valeurs des facteurs $\gamma_{s;b}$ [6]	63
5.3	Valeurs des facteurs γ_{cr} [6]	64
5.4	Valeurs du facteur $\gamma_{s;cr}$ [6]	64
5.5	Valeurs du facteur $\gamma_{R;d1}$	65
5.6	Valeurs du facteur ζ'_3 et ζ'_4 [6]	65
5.7	Valeurs du facteur γ_t [6]	66
5.8	Valeurs du facteur $\gamma_{s;t}$ [6]	66
5.9	Valeurs du facteur γ_{cr} [6]	67
5.10	Valeurs du facteur $\gamma_{s;cr}$ [6]	67
5.11	Sondage adopté pour les tests de validation	70
7.1	Tableau récapitulatif des données d'entrée pour le cas de l'exemple étudié	98
7.2	Validation test 1	103
7.3	Validation test 2	104
7.4	Validation test 3	104
7.5	Validation test 4	104
7.6	Validation test 5	105
7.7	Validation test 6	105
7.8	Validation test 7	105
7.9	Validation test 8	106
7.10	Validation test 9	106
7.11	Validation test 10	106
7.12	Validation test 11	107
7.13	Validation test 12	107
7.14	Validation test 13	107

Liste des tableaux

7.15 Validation test 14	108
7.16 Validation test 15	108
7.17 Validation test 16	108
7.18 Validation test 17	109
7.19 Validation test 18	109
7.20 Validation test 19	109
7.21 Validation Test 20	110
7.22 Validation test 21	110
7.23 Validation test 22	110
7.24 Validation test 23	111
7.25 Validation test 24	111
7.26 Validation test 25	111
7.27 Validation test 23	111
7.28 Tableau récapitulatif des données d'entrée pour le cas de l'exemple étudié	113
7.29 Validation de l'algorithme d'optimisation	117
7.30 Validation cas 1 pour la catégorie 1	123
7.31 Validation cas 2 pour la catégorie 1	124
7.32 Validation cas 3 pour la catégorie 1	125
7.33 Validation cas 4 pour la catégorie 1	126
7.34 Validation cas 5 pour la catégorie 1	126
7.35 Validation cas 6 pour la catégorie 1	127
7.36 Validation cas 1 pour la catégorie 2	128
7.37 Validation cas 2 pour la catégorie 2	129
7.38 Validation cas 3 pour la catégorie 2	129
7.39 Validation cas 4 pour la catégorie 2	130
7.40 Validation cas 5 pour la catégorie 2	131
7.41 Validation cas 6 pour la catégorie 2	132
7.42 Validation cas 1 pour la catégorie 6	132
7.43 Validation cas 2 pour la catégorie 6	133
7.44 Validation cas 3 pour la catégorie 6	134
7.45 Validation cas 4 pour la catégorie 6	135

7.46 Validation cas 5 pour la catégorie 6	135
7.47 Validation cas 6 pour la catégorie 6	136
7.48 Validation de la vérification du béton	137

Introduction générale

Dans un contexte de dérèglement climatique, les besoins en énergie neutre en carbone sont de plus en plus forts et deviennent une urgence absolue pour la protection de la planète.

Le nucléaire est une source d'énergie bas-carbone avec des émissions équivalentes à celles des sources renouvelables. La France, leader mondial dans l'**énergie nucléaire**, compte construire de nouvelles générations de réacteurs nucléaires produisant une énergie propre.

Le génie civil fait partie intégrante de la chaîne de la construction des réacteurs nucléaires et nécessite une maîtrise des outils de conception afin de réduire au maximum tout type de risque d'incident pouvant mettre en péril la sécurité des installations.

À ce propos, les réacteurs nucléaires sont conçus par modélisation numérique sur des logiciels puissants et qualifiés tels que **ANSYS** et **Code Aster**. Ces derniers rentrent dans la catégorie des logiciels multiphasiques n'offrant pas d'outils spécifiques au domaine du génie civil tel que le ferraillage mais se contentent de résultats bruts tels que les contraintes, les efforts et les déformations.

Afin de profiter au maximum de la capacité de ce type de logiciels, des post-traitements sont nécessaires pour obtenir des résultats plus appropriés au métier du génie civil, tel que le ferraillage des éléments béton (poutres, poteaux, coques, plaques, fondations...) selon les normes en vigueur.

C'est dans ce cadre que mon projet de stage s'inscrit, il porte sur la création et la validation des outils de calcul et de dimensionnement des structures en langage **APDL** et **Python**.

Le projet a pour but donc de développer des logiciels simples à utiliser qui répondent aux besoins de l'entreprise en ce qui concerne le calcul du ferraillage des structures en béton armé ainsi qu'étudier la stabilité des fondations.

Ce stage, effectué au sein de l'équipe du bureau d'études Génie Civil d'**EKIUM** dans son siège à Lyon, s'agit de mon projet de fin d'études pour la validation de mon master en génie civil.

Ce rapport comporte une présentation de l'entreprise, une présentation des tâches, normes et logiciels utilisés pour la réalisation du projet et une présentation de la méthodologie pour la création des outils. Enfin, le rapport est complété par une annexe qui comporte les détails du rapport.

PRÉSENTATION DE L'ENTREPRISE

Plan

1	Introduction	3
2	Présentation générale de l'entreprise	3
3	Activités de l'entreprise	4
4	Chiffre d'affaires de l'entreprise	4
5	Clients de l'entreprise	5
6	Conclusion	5

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'organisme d'accueil, EKIUM, et nous allons présenter aussi le service où j'ai effectué mon stage.

1.2 Présentation générale de l'entreprise

EKIUM est une société spécialisée dans les métiers de l'ingénierie et de l'automation. Elle accompagne les industries de procédé en France et à l'international. Ses équipes pluridisciplinaires interviennent de la conception à la réhabilitation des sites industriels. [1]

En l'espace de 30 ans, l'entreprise est devenue une société d'Ingénierie multi métiers et d'automation au service des industries de procédés à l'échelle nationale et internationale. [1]

La figure suivante présente l'évolution de l'entreprise :



FIGURE 1.1 : Historique d'EKIUM [1]

EKIUM est présent à l'échelle internationale comme le montre la figure suivante :

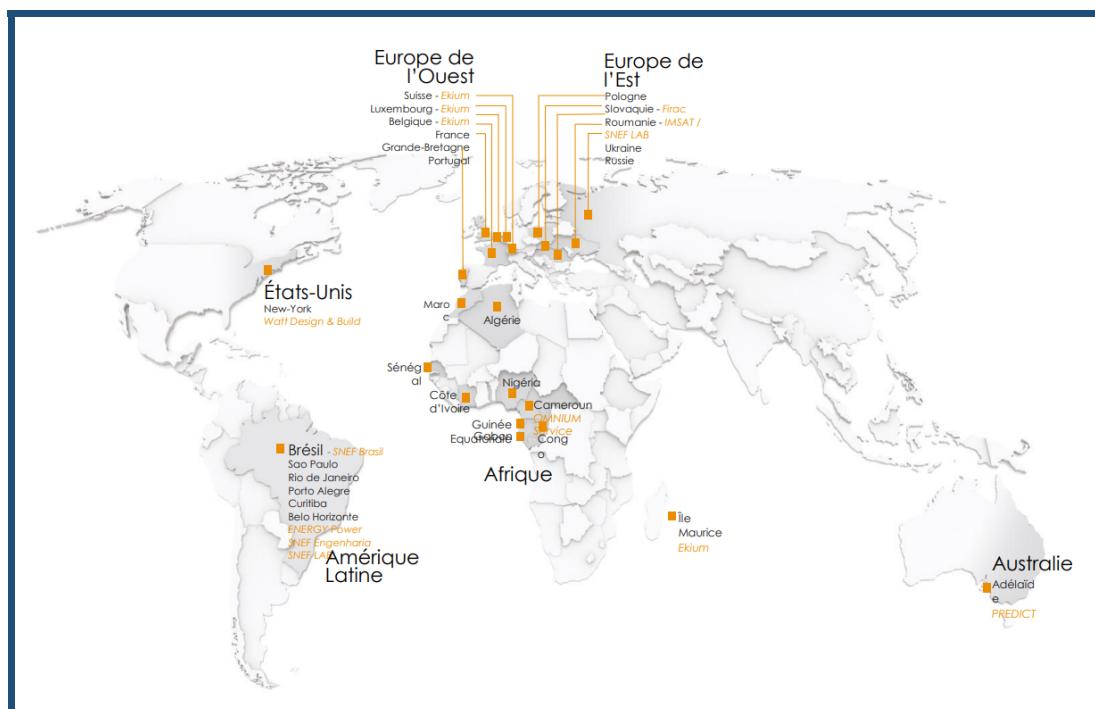


FIGURE 1.2 : Implantations d'EKIUM [1]

1.3 Activités de l'entreprise

EKIUM est structuré autour de six principaux activités : Ingénierie industrie, automation, ingénierie et services nucléaire, ingénierie et expertises de proximité, ingénierie bâtiment et consulting.

La figure suivante illustre la structuration des activités de l'entreprise :

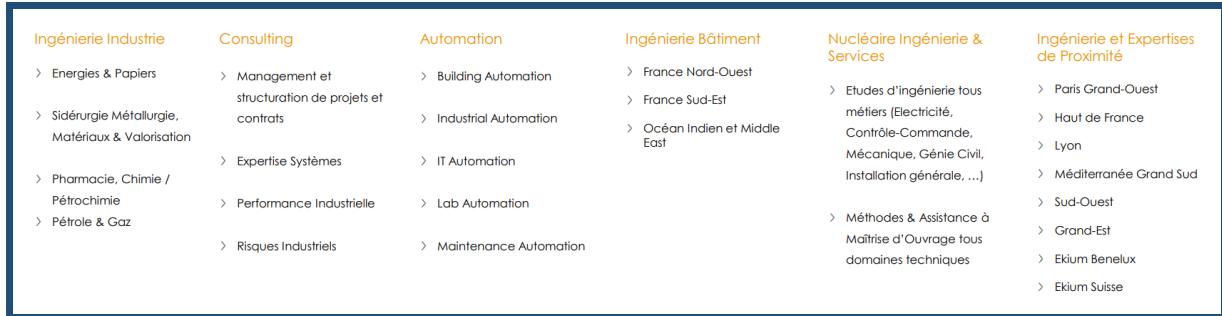


FIGURE 1.3 : Activités d'EKIUM [1]

Mon stage s'est déroulé dans le bureau d'étude Génie Civil service au sein de la BU nucléaire de l'agence de Lyon, sous l'encadrement du responsable d'activité Génie civil.

Le service génie civil de la BE nucléaire est un nouveau bureau d'étude créé il y a un an. L'effectif se compose de mon tuteur de stage et de deux autres ingénieurs nouveaux diplômés.

1.4 Chiffre d'affaires de l'entreprise

Ces dernières années, EKIUM a accéléré sa croissance et fortement augmenté ses capacités de production et de services en multipliant son effectif et son chiffre d'affaires.

La figure suivante présente la répartition de chiffre d'affaires de l'entreprise :

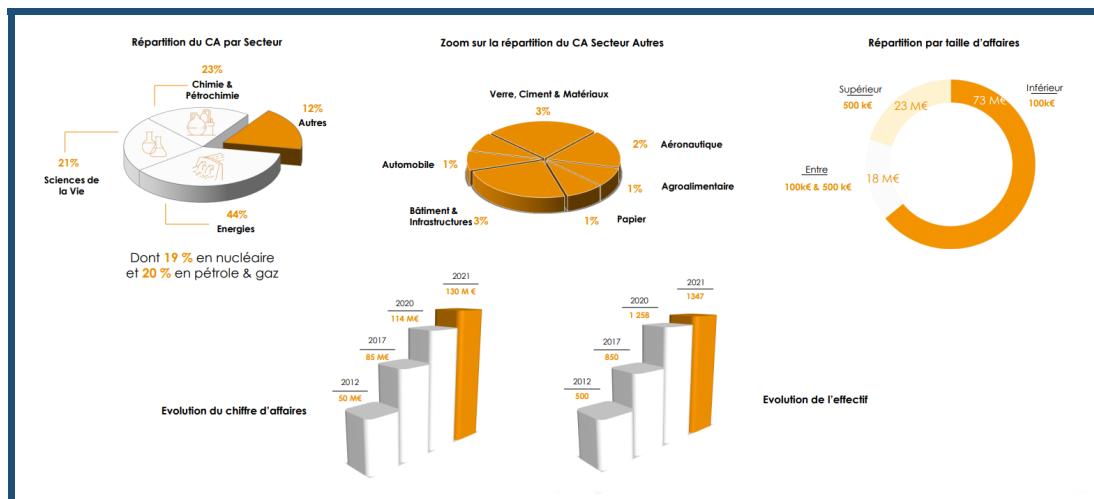


FIGURE 1.4 : Chiffre d'affaires d'EKIUM [1]

1.5 Clients de l'entreprise

Les principaux clients d'EKIUM sont des grands comptes de l'industrie française et mondiale. Certains sont même des leaders mondiaux, cela permet à Ekium d'avoir un taux d'impayés très faible. Dans la figure suivante, nous pouvons voir quelques clients répartis en fonction des marchés.



FIGURE 1.5 : Clients d'EKIUM [1]

1.6 Conclusion

Après la présentation de la société et mon service, nous passons à la partie de la présentation du stage où on décrit les tâches du projet ainsi que les normes utilisées.

PRÉSENTATION DU STAGE

Plan

1	Introduction	7
2	Présentation des tâches	7
3	Normes et règlements de calcul	8
4	Logiciels utilisés	9
5	Conclusion	14

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, je présente ce que j'ai fait pendant mon stage à **EKIUM** tout en décrivant les normes et les règlements de calculs employés dans le cadre du projet ainsi que les différents logiciels utilisés durant le stage.

2.2 Présentation des tâches

Dans le cadre de mon stage, j'ai travaillé essentiellement sur la création et la validation des outils de calcul des structures.

Tenant en considération les besoins et les attentes de l'entreprise et du service de génie civil de la BE nucléaire en particulier, nous avons clarifié les objectifs du stage. Il est donc décidé de procéder comme suit :

1. Maîtrise des normes et règlements :

- Recherche documentaire
- Appréhension les bases et les méthodes de calculs pour chaque règlements.

2. Maîtrise des logiciels et programmes :

- Recherche documentaire
- Modélisation des structures simples sur *ANSYS*
- Essai les fonctions utiles de *Python*
- Test les outils de *Mathcad*

3. Développement des outils de calculs :

- Implémentation des méthodes de calcul sur *Python*
- Ajout des algorithmes pour les liaisons *ANSYS-Python* et *Python-ANSYS*
- Ajout des algorithmes pour la lecture et l'écriture des fichiers entrée et sortie
- Ajout des algorithmes pour la création des graphes

4. Validation des outils de calculs :

- Implémentation des méthodes de calcul sur *Mathcad*
- Modélisation des structures, maillage et application des charges sur *ANSYS*
- Validation des résultats obtenues avec les fichiers *Mathcad* dans un premier temps

- Validation des résultats obtenues avec les logiciels de référence dans un deuxième temps
- Création des fichier « .exe »

5. Constitution des dossiers techniques de chaque outil pour leur mise en marché :

- Création des fichiers techniques des outils
- Mise en forme des fichiers résultats
- Adopter les outils à des licences d'utilisation

2.3 Normes et règlements de calcul

Durant la période de stage, nous nous sommes principalement servis des normes suivantes :

2.3.1 BAEL 91 révisé 99 [2]

Le Béton Armé aux Etats Limites est un code français qui date depuis 1983 et qui a été révisé en 1991 et en 1999. Il s'agit de règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites

2.3.2 NF EN 1992-1-1 [3]

La norme européenne Eurocode 2 : Calcul des structures en béton : Règles générales et règles pour les bâtiments s'applique au calcul des bâtiments et des ouvrages de génie civil en béton non armé, en béton armé ou en béton précontraint.

2.3.3 RCC-CW [4]

Le RCC-CW, Règles de conception et réalisation pour le génie civil des centrales nucléaires REP, fournit les règles pour la conception, la construction et les essais relatifs aux ouvrages de génie civil des réacteurs à eau pressurisée REP.

Il décrit les principes et les exigences associés aux conditions de sûreté, de service et de durabilité pour les ouvrages en béton et les charpentes métalliques associés à des dispositions spécifiques pour les bâtiments classés de sûreté.

2.3.4 NF P 94-261 [5]

Il s'agit du Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations superficielles.

Il constitue la norme d'application nationale de l'Eurocode 7 relative aux fondations superficielles, il définit la terminologie et les notations employées, il décrit leur comportement et il fournit les règles de justification et redimensionnement de ce type d'ouvrage aux états limites en ce qui concerne les aspects géotechniques.

2.3.5 NF P 94-262 [6]

Il s'agit du Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes.

Il s'agit de la norme d'application nationale de l'Eurocode 7 relative aux fondations profondes, il définit la terminologie et les notations employées, il décrit leur comportement et fournit les règles permettant de justifier et de redimensionner ce type de structure aux états limites en ce qui concerne les aspects géotechniques.

2.3.6 NF EN 1998-5 [7]

C'est la norme européenne EN 1998-5, Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes : Fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques.

Cette norme établit les prescriptions, critères et règles relatifs au choix du site et au sol de fondation en relation avec la résistance sismique des structures.

2.4 Logiciels utilisés

2.4.1 Ansys APDL [8]

2.4.1.1 Présentation

Ansys Mechanical est un logiciel d'analyse par élément fini utilisé pour la simulation de modèles de structures, de composants électroniques ou de machines, afin d'analyser la résistance, la ténacité, l'élasticité, la distribution de la température, l'électromagnétisme, l'écoulement des fluides, etc. [8]

En effet, ce logiciel recouvre l'ensemble des étapes nécessaires à une simulation : le traitement géométrique, le maillage, la résolution, le traitement des résultats.

Ansys Parametric Design Language (APDL) est un langage de script structuré servant à interagir avec le solveur Ansys Mechanical.

2.4.1.2 Pourquoi Ansys APDL

Ansys APDL peut être utilisé pour de nombreuses tâches, allant de la création de formes géométriques à l'application de sollicitations pour les analyses.

Nous avons utilisé Ansys pour modéliser les structures et pour appliquer les sollicitations et les descentes de charges en une première étape.

Une seconde étape consiste à appliquer le maillage de la structure à l'aide de ce logiciel.

Ansys nous aide aussi à faire appel à un fichier « .exe » issus de Python d'une part et des fichiers « .txt » d'autre part.

Il est à noter que Ansys permet non seulement d'afficher le taux d'acier calculé au niveau de chaque élément fini, mais également d'afficher les résultats dans des tableaux.

2.4.1.3 Documentation

Tout le long du stage, nous nous sommes servis des fonctions de Ansys APDL suivantes :

- ***set** : permet l'affectation de valeurs aux variables nommées par l'utilisateur
- ***dim** : permet la définition d'un tableau de variables et de ses dimensions
- ***vread** : permet la lecture des données et la création d'un tableau de variables
- ***cfopen** : permet l'ouverture d'un fichier
- ***vwrite** : permet l'écriture dans un fichier
- ***get** : permet la récupération d'une donnée d'entrée et son stockage dans une variable nommée par l'utilisateur
- ***vget** : permet la récupération des données d'entrée et leur stockage dans un tableau nommé par l'utilisateur
- ***vput** : permet la restauration des éléments tables
- ***msg** : permet l'écriture d'un message sortie dans ANSYS
- ***do** et ***enddo** : permet la création des boucles
- ***if**, ***elseif** et ***endif** : permet l'exécution d'une condition
- **/sys** : permet le transfert d'une commande à l'ordinateur, dans notre cas c'est l'exécution de l'outil de calcul
- **/clear** : permet le nettoyage de la base de données du programme en cours

- **/post1** : chemin d'accès menu Ansys : permet l'entrée dans la base de données des résultats
- **/prep7** : chemin d'accès menu Ansys : permet la saisie des données pour la création du modèle
- **/solu** : permet le processus de la solution
- **etable** : permet le remplissage d'un tableau de variables
- **erase** : permet la suppression d'une variable présentée
- **lesize** : permet la spécification des proportions de division et d'espacement sur les éléments non maillés
- **esize** : permet le numéro par défaut pour le maillage
- **lmesh** : permet le maillage des lignes sélectionnées
- **amesh** : permet le maillage des surfaces sélectionnées
- **allsel** : permet la sélection de toutes les entités
- **nsel** : permet la sélection d'un ensemble de noeuds
- **esel** : permet la sélection d'un ensemble d'éléments
- **ksel** : permet la sélection d'un ensemble de points
- **lsel** : permet la sélection d'un ensemble de lignes
- **lslk** : permet la sélection d'un ensemble de lignes qui contiennent les points déjà sélectionnés
- **allsel** : permet la sélection de tous les éléments
- **eplot** : permet l'affichage des éléments sélectionnés
- **replot** : permet la relance automatiquement de la dernière commande d'affichage
- **A** : permet la définition d'une surface
- **D** : permet la définition des degrés de liberté pour un noeud
- **E** : permet la définition d'un élément
- **F** : permet la définition d'une ligne entre deux points
- **K** : permet la définition d'un point
- **L** : permet la définition d'une force sur un noeud
- **N** : permet la définition d'un noeud
- **SF** : permet la définition d'une force surfacique sur des noeuds
- **ET** : permet la définition du type de l'élément

- **sfbeam** : permet la définition d'une charge surfacique sur une poutre
- **BEAM188** : permet la définition de la section en poutre
- **SHELL181** : permet la définition de la section en plaque
- **solve** : permet le lancement d'une solution : permet le lancement d'une solution

2.4.2 Python [9]

2.4.2.1 Présentation

Python est un langage de programmation qui sert à créer des sites Web et des logiciels, à automatiser des tâches et à effectuer des analyses de données. [9]

Il s'agit d'un langage polyvalent, qui permet de créer une variété de programmes différente et n'est pas spécialisé dans des problèmes spécifiques. [9]

Cette polyvalence, ainsi que sa facilité d'utilisation, ont rendu Python l'un des langages de programmation les plus répandus aujourd'hui. [9]

En effet, parmi ses qualités, Python libère les développeurs des contraintes de formes qui occupaient leur temps comme il est le cas des langues anciennes. De ce fait, le développement de code avec Python est plus rapide qu'avec d'autres langages. [9]

2.4.2.2 Pourquoi Python

Au cours du stage, nous avons utilisé Python comme langage et ses bibliothèques associées **NumPy** et **Matplotlib** pour le calcul scientifique et la visualisation.

Nous avons choisi Python parce que ce langage nous offre des fonctionnalités très utiles comme lire et extraire des fichiers, résoudre des problèmes mathématiques et générer des graphes, le tout dans une interface facile à manipuler.

En outre, et puisque **EKIUM** veut sécuriser ses outils d'une part et les louer en tenant compte d'une date limite de la licence d'autre part, les modules **os** et **shutil** de Python répondent belle et bien à ce besoin.

En ce qui concerne l'environnement de développement de script, nous avons choisi le logiciel libre *Anaconda* qui propose une utilisation simple de Python et une installation rapide et surtout facile des bibliothèques requises. [10]

2.4.2.3 Documentation

Tout au long du stage, nous avons décidé de développer nos outils de calcul en utilisant la version récente de ce langage, Python 3 et pour la création de notre script, nous avons eu besoin de faire appel à quelques fonctions comme :

- **NumPy** : bibliothèque de Python, permet la gestion facile des tableaux pour effectuer des calculs numériques
- **Matplotlib** : bibliothèque de Python, permet la création de graphes statiques, animés ou interactives
- **CVXPY** : langage de modélisation intégré dans Python, permet l'expression du problème mathématique sous la forme d'un système linéaire et la résolution de ce système
- **sys** : permet l'interaction avec l'interpréteur Python
- **os** : module de Python, permet l'effectuation des opérations liées au système d'exploitation
- **shutil** : module de Python, permet les opérations sur les fichiers
- **open()** : permet l'ouverture des fichiers
- **write()** : permet l'écriture dans les fichiers
- **readline()** : permet la lecture d'une ligne à partir d'un fichier
- **close()** : permet la fermeture des fichiers
- **exit()** : permet la fermeture du programme
- **append()** : permet d'ajouter un élément à la fin d'une liste
- **print()** : permet d'afficher les variables
- **def** et **return** : permet la définition d'une nouvelle fonction
- **for** : permet la création des boucles
- **if, elif** et **else** : permet l'exécution d'une condition
- **try** et **except** : permet d'éviter le blocage du programme en cas d'une erreur

2.4.3 PTC Mathcad [11]

2.4.3.1 Présentation

PTC Mathcad est un logiciel informatique puissant qui se distingue par ses capacités de documentation, sa simplicité d'utilisation et sa rapidité par rapport à d'autres outils.[11]

Il sert principalement à combiner différents éléments (variables, texte de description, etc.) sous la forme d'une feuille de calcul. Ceci permet de manipuler les variables, les hypothèses et les expressions, qui à leur tour s'actualisent en temps réel.

Cet outil propose également des centaines d'opérateurs et de fonctionnalités intégrées pour réaliser des calculs.

2.4.3.2 Pourquoi PTC Mathcad

Parmi les avantages de PTC Mathcad, il permet de visualiser intuitivement les algorithmes de calcul. Il est ainsi plus facile de définir, de comprendre et de manipuler les calculs à l'aide d'une interface exceptionnelle similaire à un tableau blanc où un bloc-notes.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les tâches exécutées pendant le stage ainsi que les règlements de calculs et les logiciels utilisés afin de développer nos outils de calcul.

EKBEAM

Plan

1	Introduction	16
2	Description de l'outil	16
3	Objet de l'outil	16
4	Fonctionnement de l'outil	17
5	Méthode de calcul	22
6	Tests de validation	37
7	Exemple de calcul	39
8	Conclusion	39

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous introduisons l'outil de calcul **EKbeam**, son but et la façon dont il fonctionne.

Nous décrivons également les méthodes de calcul que nous avons utilisées pour élaborer cet outil ainsi que les étapes de sa validation.

3.2 Description de l'outil

EKbeam est un outil de calcul de ferraillage des éléments filaires (poteaux et poutres de sections rectangulaires) développé par l'entreprise **EKIUM** sous le langage *Python 3* (solveur) et *APDL* (données d'entrée et affichage des résultats).

Le fonctionnement de cet outil nécessite des données d'entrée issues du logiciel *ANSYS* (numéros de barres, géométrie, efforts, etc.).

3.3 Objet de l'outil

L'objet de l'outil **EKbeam** est de calculer les armatures longitudinales et transversales dans les éléments de poutres et poteaux en béton de section rectangulaire.

Les calculs sont réalisés conformément aux règles suivantes (au choix de l'utilisateur) :

- BAEL [2]
- EC2 [3]
- RCC-CW [4]

Les calculs sont réalisés soit à l'ELU, soit à l'ELA, soit à l'ELS (au choix de l'utilisateur) :

- À l'ELU et l'ELA, les armatures longitudinales et transversales sont calculées
- À l'ELS, seules les armatures longitudinales sont calculées pour BAEL et EC2, pour RCC-CW les armatures longitudinales et transversales sont calculées.

L'outil **EKbeam** requiert en entrée :

- Un fichier de données « fic.don » définissant les paramètres de calculs
- Des fichiers au format « .txt », chaque fichier contient toutes les sollicitations appliquées sur les éléments à traiter pour une combinaison de charge choisie. Les sollicitations et les combinaisons de charges sont calculées et fournies par l'intermédiaire du logiciel « ANSYS ».

L'outil **EKbeam** fournit en sortie :

- Un fichier message au format « .txt » généré automatiquement récapitulant les données d'entrée
- Un fichier de résultats contenant les différentes sections d'armatures de chaque élément, au format « .txt ». Ce fichier va être récupéré par *ANSYS* afin de présenter graphiquement les résultats.

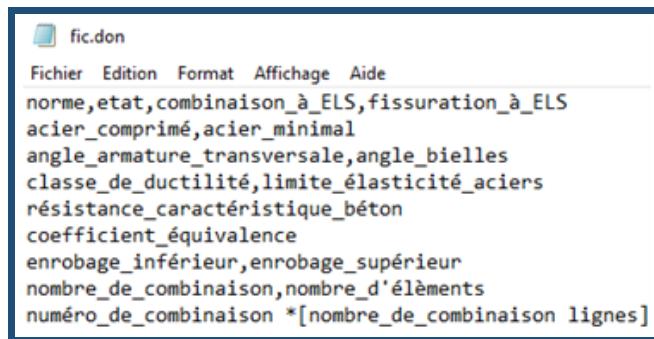
3.4 Fonctionnement de l'outil

Pour lancer l'outil **EKbeam**, on doit utiliser le logiciel *ANSYS*, il suffit de taper "ekbeam", le nom de l'outil, dans la barre de commande de *ANSYS*.

Tout d'abord, avant de lancer **EKbeam**, il faut s'assurer que le fichier contenant les données et les paramètres de calcul « *fic.don* » existe dans le même répertoire que le fichier « .db » et *EKbeam.exe*.

3.4.1 Fichiers de données

Le fichier de données « *fic.don* » doit comporter [8 + nombre de combinaisons de charge à traiter] lignes. Le fichier de données doit prendre la forme suivante :



```

fic.don
Fichier Edition Format Affichage Aide
norme,etat,combinaison_à_ELS,fissuration_à_ELS
acier_comprimé,acier_minimal
angle_armature_transversale,angle_bielles
classe_de_ductilité,limite_elasticité_aciers
résistance_caractéristique_béton
coefficient_équivalence
enrobage_inférieur,enrobage_supérieur
nombre_de_combinaison,nombre_d'éléments
numéro_de_combinaison *[nombre_de_combinaison lignes]

```

FIGURE 3.1 : Forme du fichier de données « *fic.don* »

❑ Ligne 1

— norme : règlement de calcul :

- BAEL
- EC2
- RCC-CW

— etat : état limite de calcul :

- ELU
 - ELS
 - ELA
- combinaison à ELS : type de l'état limite de service :
- « QP » pour quasi-permanente
 - « F » pour Fréquent
 - « C » pour Caractéristique
 - « NA » en cas de combinaison à l'ELU où à l'ELA
- fissuration à ELS : paramètre définissant le type de fissuration à prendre en compte lors d'un calcul au BAEL :
- « FPP » pour Fissuration Peu Préjudiciable
 - « FP » pour Fissuration Préjudiciable
 - « FTP » pour Fissuration Très Préjudiciable

□ **Ligne 2**

- acier comprimé : paramètre définissant la prise en compte des aciers comprimés lors du calcul des aciers longitudinales :
- OUI
 - NON
- acier minimal : paramètre définissant le besoin de calculer des sections minimales suivant le règlement choisi :
- OUI
 - NON

□ **Ligne 3**

- angle armature transversale : angle α d'inclinaison des armatures pour le calcul des aciers transversales :
- 45°
 - 90°
- angle bielles : angle θ de l'inclinaison des bielles de béton comprimé ($^\circ$).

□ **Ligne 4**

- classe_de_ductilité : paramètre qui définit la classe de ductilité des aciers suivant l'EC2 :
 - « A » pour une ductilité normale, classe A, 2.5%
 - « B » pour une haute ductilité, classe B, 5%
 - « C » pour une très haute ductilité, classe C, 7.5%
 - « NA » en cas de BAEL ou RCC-CW.
- limite_elasticité_aciers : limite caractéristique d'élasticité de l'acier (MPA) :
 - 400
 - 500

□ **Ligne 5**

- résistance_caractéristique_béton : résistance caractéristique en compression (MPA).

□ **Ligne 6**

- coefficient équivalence : coefficient d'équivalence effectif $\alpha_e = \frac{E_s}{E_{c,eff}}$.

□ **Ligne 7**

- enrobage_inférieur : enrobage des aciers inférieurs (m).
- enrobage_supérieur : enrobage des aciers supérieurs (m).

□ **Ligne 8**

- nombre_de_combinaison : nombre de combinaisons prises en compte pour le calcul.
- nombre_d'éléments : nombre d'éléments finis à calculer.

□ **Ligne 9 jusqu'à [nombre_de_combinaison+9]**

- numéro_de_combinaison : l'utilisateur énumère par ligne les numéros des combinaisons pour lesquelles il souhaite faire le calcul.

3.4.2 Fichier de combinaisons

L'outil **EKbeam**, en fonction des données d'entrée, crée des fichiers de combinaisons sous le nom « *comb_i* » contenant la géométrie et les efforts.

Un fichier de combinaison de charges « *comb_i* » doit comporter [nombre_d'éléments] lignes.

Le fichier de combinaison a la forme suivante :

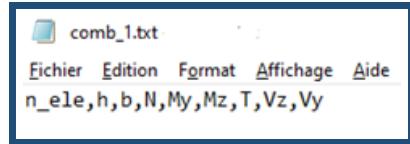


FIGURE 3.2 : Forme du fichier de données « *comb_i* »

- *n_ele* : numéro de l'élément
- *h* : hauteur de l'élément (m)
- *b* : largeur de l'élément (m)
- *N* : effort normal
- *My* : moment fléchissant suivant l'axe (y)
- *Mz* : moment fléchissant suivant l'axe (z)
- *T* : moment de torsion
- *Vz* : effort tranchant suivant l'axe (z)
- *Vy* : effort tranchant suivant l'axe (y).

3.4.3 Fichier de résultats

Après l'exécution d'**EKbeam**, un fichier résultats de type « *Résultat de calcul .txt* » est créé.

Chaque ligne du fichier de résultat a la forme suivante :

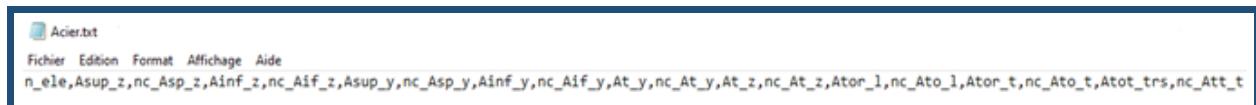


FIGURE 3.3 : Forme du fichier de résultats « *Résultat de calcul* »

- *n_ele* : numéro de l'élément
- *Asup_z* : section d'armatures longitudinales supérieures selon l'axe (z)
- *nc_Asp_z* : numéro de combinaison dimensionnante pour la section *Asup_z*
- *Ainf_z* : section d'armatures longitudinales inférieures selon l'axe (z)
- *nc_Aif_z* : numéro de combinaison dimensionnante pour la section *Ainf_z*
- *Asup_y* : section d'armatures longitudinales supérieures selon l'axe (y)
- *nc_Asp_y* : numéro de combinaison dimensionnante pour la section *Asup_y*
- *Ainf_y* : section d'armatures longitudinales inférieures selon l'axe (y)

- *nc_Aif_y* : numéro de combinaison dimensionnante pour la section Ainf_y
- *At_y* : section d'armatures transversales selon l'axe (y)
- *nc_At_y* : numéro de combinaison dimensionnante pour la section At_y
- *At_z* : section d'armatures transversales selon l'axe (z)
- *nc_At_z* : numéro de combinaison dimensionnante pour la section At_z
- *Ator_l* : section d'armatures longitudinales selon la torsion
- *nc_Ato_l* : numéro de combinaison dimensionnante pour la section Ator_l
- *Ator_t* : section d'armatures transversales selon la torsion
- *nc_Ato_t* : numéro de combinaison dimensionnante pour la section Ator_t
- *Atot_trs* : section d'armatures transversales totale
- *nc_Atot_t* : numéro de combinaison dimensionnante pour la section Atot_trs.

Le fichier « *Résultat de calcul.txt* » est lu par le logiciel « *ANSYS* » afin de présenter les résultats en format « *ETABLE* », ce qui permet à l'utilisateur d'extraire des tableaux et d'afficher les cartographies de ferraillage.

Une valeur de 9999 dans les résultats veut dire que la section du béton est insuffisante et qu'il faut la redimensionner.

3.4.4 Fichier de récapitulation des données

Lors du calcul, l'outil **EKbeam** crée automatiquement un fichier récapitulatif des données renseignées par l'utilisateur « *Récapitulation des données.txt* », cet outil recapitule les principales caractéristiques du problème traité. Le fichier récapitulatif prend l'allure suivante :

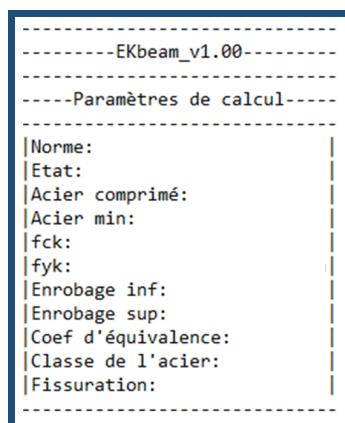


FIGURE 3.4 : Forme du fichier de récapitulation « *Récapitulation des données* »

3.4.5 Message d'erreur

Le calcul de ferraillage est valide pour une classe de béton inférieure à C90/105. **EKbeam** affiche un message d'erreur (voir la figure suivante) si la classe rentrée est différente des valeurs suivantes : 55, 60, 70, 80, 90 MPa si le calcul est requis pour des valeurs f_{ck} supérieures à 50MPa.



FIGURE 3.5 : Forme du message d'erreur

3.5 Méthode de calcul

La méthode est fondée sur le principe de l'équilibre de chaque section. Il s'agit d'un calcul statique d'une poutre ou d'un poteau en béton armé à partir des sollicitations précédemment obtenues à partir du logiciel « *ANSYS* ».

Les éléments à dimensionner sont des sections rectangulaires.

Pour chaque élément, on effectue un calcul en béton armé et on en déduit :

- Les sections d'armatures longitudinales supérieure et inférieure équilibrant les efforts appliqués
- Les sections d'armatures transversales dues à l'effort tranchant
- Les sections d'armatures longitudinales et transversales dues à la torsion.

On en déduit également le ferraillage transversal total nécessaire pour équilibrer l'effort tranchant et la torsion.

Le calcul est réalisé à l'ELU, à l'ELS ou à l'ELA (accidentel), suivant le choix de l'utilisateur, à partir de :

- Sollicitations lues depuis les fichiers des combinaisons nommés « *comb_i* » où i est le numéro de la i^{eme} combinaison de charge. Ces fichiers contiennent aussi les hauteurs et les largeurs des éléments à dimensionner.
- Données du calcul fournis par l'utilisateur dans le fichier de données « *fic.don* ».

3.5.1 Efforts

Les sollicitations sont préalablement obtenues par l'intermédiaire du logiciel « *ANSYS* ».

3.5.2 Calcul béton armé

Pour les calculs béton armé, l'utilisateur choisit d'une part le règlement, soit l'EC2, soit le BAEL ou le RCC-CW et d'autre part, l'état limite, soit l'ELU, soit l'ELA ou l'ELS.

3.5.2.1 Loi de comportement du béton

La loi de comportement du béton prise en compte en cas d'une section entièrement comprimé est celle du diagramme bilinéaire [12] :

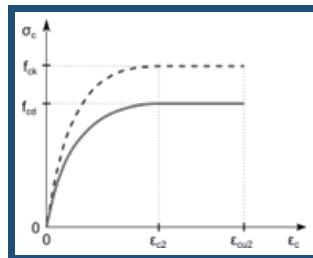


FIGURE 3.6 : Diagramme parabole rectangle contrainte - déformation du béton [13]

La loi de comportement du béton prise en compte en cas d'une section entièrement tendue où partiellement comprimé est celle du diagramme bilinéaire :

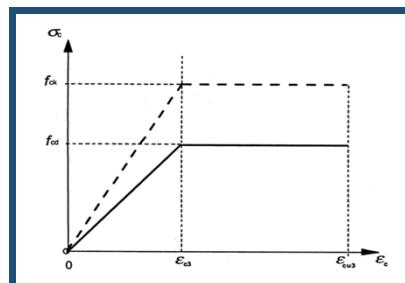


FIGURE 3.7 : Diagramme rectangulaire simplifié contrainte - déformation du béton [13]

3.5.2.2 Loi de comportement de l'acier

La loi de comportement de l'acier prise en compte est celle du diagramme à palier horizontal :

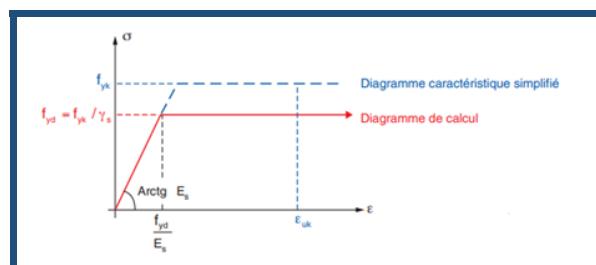


FIGURE 3.8 : Diagramme contrainte - déformation de l'acier [13]

3.5.2.3 Règle des trois pivots

Le calcul est basé sur l'équilibre des forces suivant la règle des 3 pivots illustrés ci-dessous.

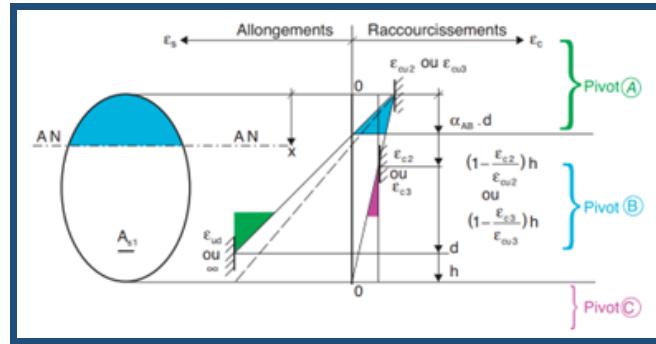


FIGURE 3.9 : Diagramme des déformations limites de la section - règle des trois pivots [13]

3.5.2.4 Principe d'équilibre d'une section en béton armé

Le principe d'équilibre des sections est présenté par les figures ci-dessous :

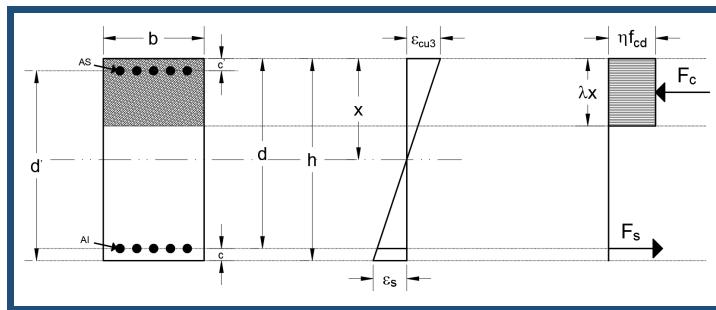


FIGURE 3.10 : Équilibre d'une section rectangulaire en béton armé à l'ELU

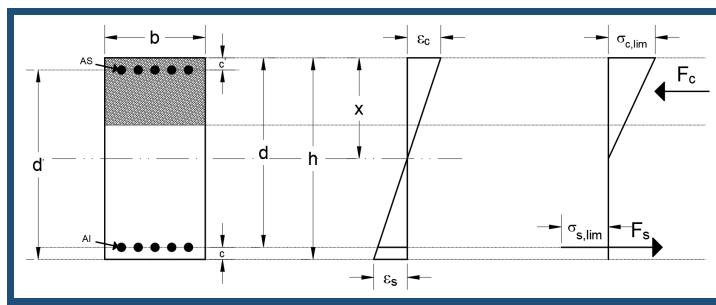


FIGURE 3.11 : Équilibre d'une section rectangulaire en béton armé à l'ELS

Avec :

- h : la hauteur de l'élément
- b : la largeur de l'élément
- c et c' : respectivement les enrobages inférieur et supérieur
- d et d' : respectivement les hauteurs utiles tel que : $d = h - c$ et $d' = h - c'$

3.5.3 Calcul des armatures

On cherche à déterminer les sections de ferraillage permettant d'équilibrer les sections de béton armé de chaque élément à partir des sollicitations N (effort normal), M (moment fléchissant), T (moment de torsion) et V (effort tranchant) avec la convention suivante :

- Une valeur négative de N engendre un effort de compression
- Une valeur positive de M engendre une contrainte de traction de la fibre inférieure de l'élément

Le tableau suivant récapitule les paramètres nécessaires aux calculs selon le règlement :

TABLEAU 3.1 : Paramètres de calcul

	EC2 [3]			BAEL [2]			RCC-CW [4]		
	ELU	ELS	ELA	ELU	ELS	ELA	ELU	ELS	ELA
γ_c	1.5	1	(1)	1.5	1	1	1.5	1	1.2
γ_s	1.15	1	1	1.15	1	1	1.15	1	1
α_{cc}	1	1	1	0.85	0.85	0.85	0.85	1	1
λ	$\min(0.8, 0.8 - \frac{f_{ck}-50}{400})$			0.8			$\min(0.8, 0.8 - \frac{f_{ck}-50}{400})$		
η	$\min(1, 1 - \frac{f_{ck}-50}{200})$			1			$\min(1, 1 - \frac{f_{ck}-50}{200})$		
ϵ_{ud}	$0.9 * \epsilon_{uk}$			1%			$0.9 * \epsilon_{uk}$		
ϵ_{c3}	$\min(1.75, 1.75 + 0.55 * (\frac{f_{ck}-50}{40})^4)$			0.2%			$\min(1.75, 1.75 + 0.55 * (\frac{f_{ck}-50}{40})^4)$		
ϵ_{cu3}	$\min(0.35, 0.26 + 3.5 * (\frac{90-f_{ck}}{100})^4)$			0.35%			$\min(0.35, 0.26 + 3.5 * (\frac{90-f_{ck}}{100})^4)$		
f_{cd}	$\frac{\alpha_{cc}*f_{ck}}{\gamma_c}$			$\frac{\alpha_{cc}*f_{cj}}{\gamma_c}$			$\frac{\alpha_{cc}*f_{ck}}{\gamma_c}$		
f_{yd}	$\frac{f_{yk}}{\gamma_s}$			$\frac{f_e}{\gamma_s}$			$\frac{f_{yk}}{\gamma_s}$		

Avec :

- (1) : ELA sismique : 1.3, ELA accidentelle : 1.2
- γ_c : coefficient partiel relatif au béton
- γ_s : coefficient partiel relatif à l'acier de béton armé ou de précontrainte
- α_{cc} : coefficient tenant compte des effets à long terme sur la résistance en compression
- λ : hauteur utile de la zone comprimée
- η : résistance effective

- ϵ_{ud} : déformation limite des aciers
- ϵ_{c3} : déformation élastique du béton
- ϵ_{cu3} : déformation ultime du béton
- f_{cd} : valeur de calcul de la résistance en compression du béton
- f_{yd} : limite d'élasticité de calcul de l'acier de béton armé

La détermination des pivots est décrite dans le tableau ci-dessous :

TABLEAU 3.2 : Détermination des pivots [13]

	ELS	ELU-ELA
Le ratio de hauteur comprimée de la section au pivot A	$\alpha_{AB} = \frac{\alpha_e * \bar{\sigma}_c}{\alpha_e * \bar{\sigma}_c + \bar{\sigma}_s}$	$\alpha_{AB} = \frac{\epsilon_{cu3}}{\epsilon_{cu3} + \epsilon_{ud}}$
Le ratio de hauteur comprimée de la section au pivot C	$\alpha_{BC} = 1$	$\alpha_{BC} = 1$
Le moment réduit délimitant le passage du pivot A à B	$\mu_{AB} = \lambda * \alpha_{AB} * \left(1 - \frac{\alpha_{AB}}{3}\right)$	$\mu_{AB} = \lambda * \alpha_{AB} * (1 - 0.5 * \lambda * \alpha_{AB})$
Le moment réduit limite au pivot C	$\mu_{BC} = \frac{1}{3}$	$\mu_{BC} = \lambda * (1 - 0.5 * \lambda)$

Avec :

- α_e : coefficient d'équivalence
- $\bar{\sigma}_c$: contrainte limite de compression du béton à l'ELS
- $\bar{\sigma}_s$: contrainte limite de traction de l'acier à l'ELS

3.5.3.1 Calcul des armatures à l'ELU et l'ELA

Les sollicitations à prendre en compte dans le calcul de la flexion composée sont l'effort normal N et le moment fléchissant M.

La flexion composée engendre des armatures longitudinales inférieures A_{inf} et des armatures longitudinales supérieurs A_{sup} en fonction des sollicitations.

Le calcul se fait suivant la démarche suivante :

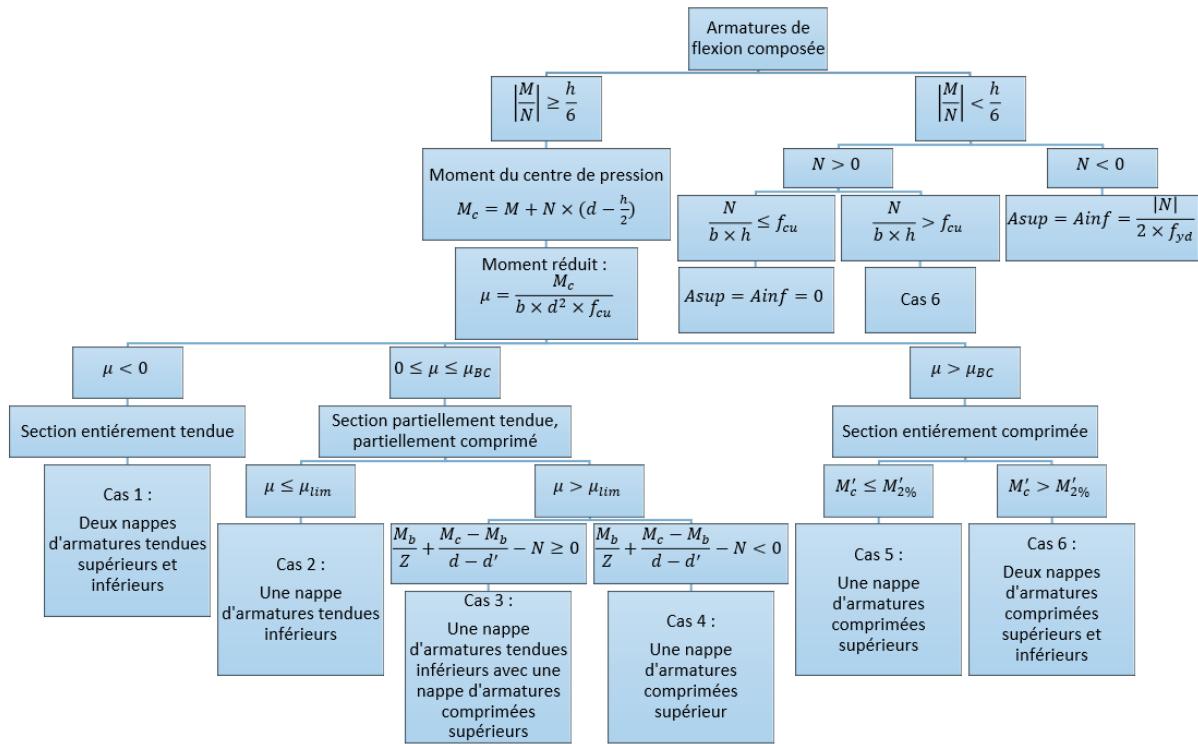


FIGURE 3.12 : Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELU et l'ELA

Avec :

- μ_{lim} : moment limite ultime réduit
- $M_b = \mu_{lim} * b * d^2 * f_{cu}$
- $M' = -M + N * (d - \frac{h}{2})$
- $M'_{2\%}$: le moment maximal que le béton peut prendre [12] : $M'_{2\%} = B * h^2 * f_{cu} (\frac{1}{2} - \frac{d'}{h})$

La démarche de calcul du cas 1 est décrit ci-dessous :

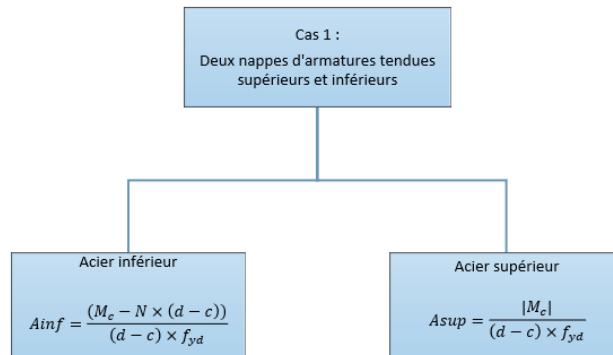


FIGURE 3.13 : Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELU et l'ELA - cas 1

La démarche de calcul du cas 2 est décrit ci-dessous :

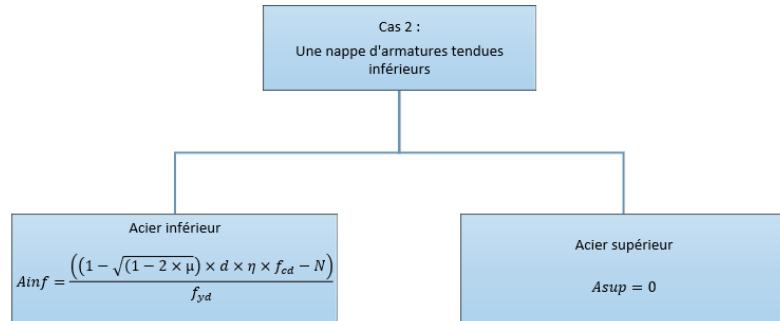


FIGURE 3.14 : Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELU et l'ELA - cas 2

La démarche de calcul du cas 3 est décrit ci-dessous :

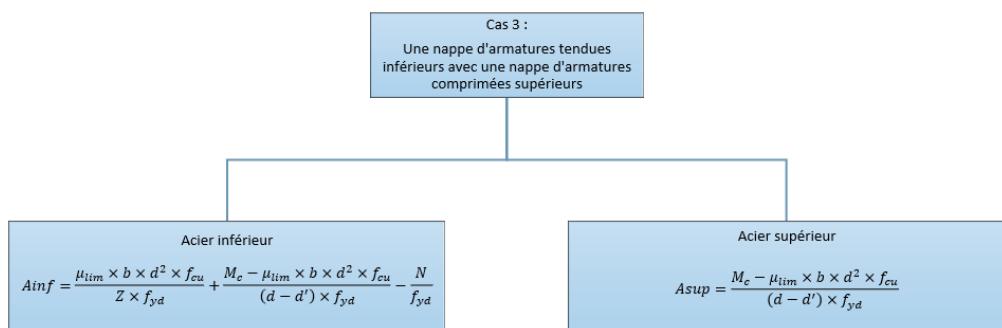


FIGURE 3.15 : Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELU et l'ELA - cas 3

La démarche de calcul du cas 4 est décrit ci-dessous :

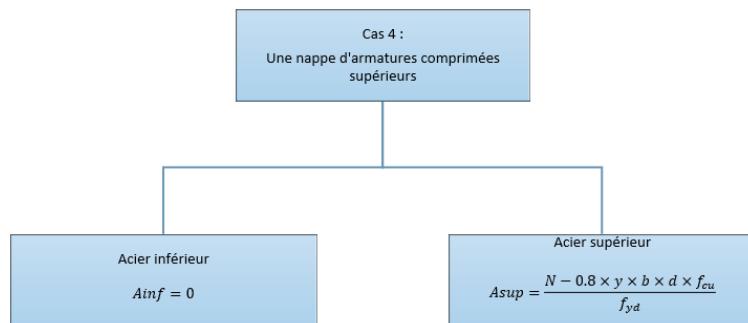


FIGURE 3.16 : Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELU et l'ELA - cas 4

En effet, on équilibre les moments par rapport aux armatures comprimées : $M'_c = N_b * z'$

Avec :

$$— N_b = 0.8 * y * b f_{cu}$$

$$— z' = 0.4 * h - d'$$

$$\text{On obtient : } y = 1.25 * (d' + \sqrt{d'^2 + 2 * \frac{M'_c}{b * f_{cu}}})$$

La démarche de calcul du cas 5 est décrit ci-dessous :

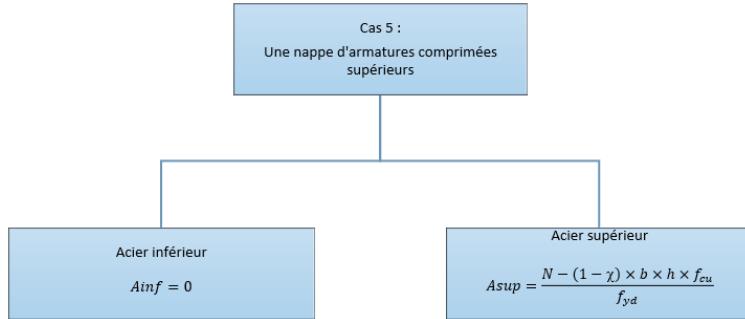


FIGURE 3.17 : Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELU et l'ELA - cas 5

Pour les sections entièrement comprimées, on procède par le diagramme parabole rectangle du béton. On équilibre les moments par rapport aux armatures comprimées : $M'_c = N_b * z'$

Avec :

$$— N_b = (1 - \chi) * y * b f_{cu}$$

$$— z' = \frac{\frac{1}{2} - \frac{6}{7}\chi}{1-\chi} * h - d'$$

$$\text{On obtient : } y = \frac{\frac{1}{2} - \frac{d'}{h} - \mu_c}{b * h^2 * f_{cu}}, \text{ avec : } \mu_c = \frac{-M + N * (d - \frac{h}{2})}{b - h^2 * f_{cu}}$$

La démarche de calcul du cas 6 est décrit ci-dessous :

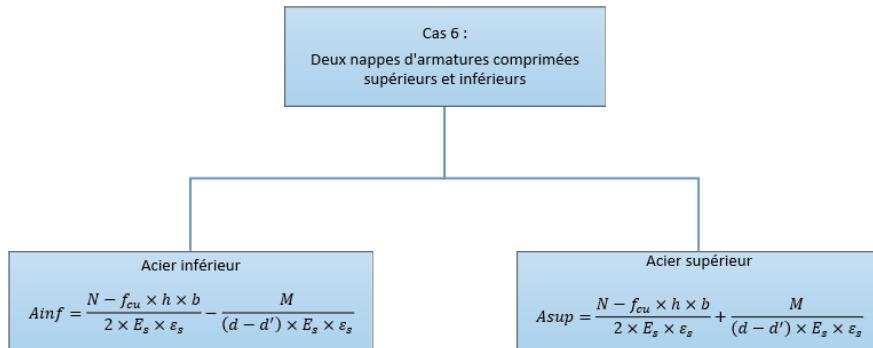


FIGURE 3.18 : Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELU et l'ELA - cas 6

Avec :

— E_s : module d'élasticité de l'acier

— ϵ_s : allongement des aciers

Le principe des calculs pour la flexion simple est le même que celui de la flexion composée avec $N=0$.

La sollicitation à prendre en compte dans le calcul de la traction simple est l'effort normal N avec N négative.

La traction simple engendre des armatures longitudinales inférieures A_{inf} et des armatures longitudinales supérieurs A_{sup} identiques $A = A_{inf} = A_{sup}$. La démarche de calcul est comme suit :



FIGURE 3.19 : Diagramme de calcul des armatures de traction simple à l'ELU et l'ELA

La sollicitation à prendre en compte dans le calcul de la compression simple est l'effort normal N avec N positive.

La compression simple engendre des sections d'armatures longitudinales inférieures A_{inf} et supérieurs A_{sup} égaux $A = A_{inf} = A_{sup}$, si besoin. La démarche de calcul est comme suit :

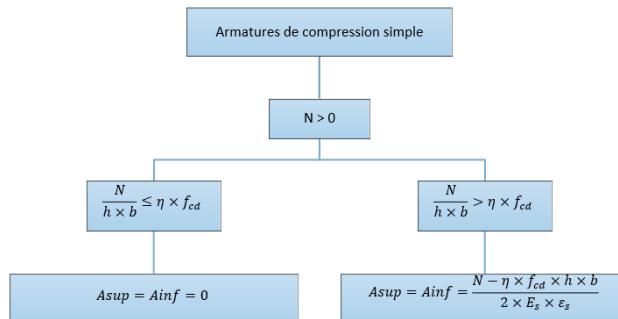


FIGURE 3.20 : Diagramme de calcul des armatures de compression simple à l'ELU et l'ELA

La sollicitation à prendre en compte dans le calcul de l'effort tranchant est seulement l'effort de tranchant V. L'effort tranchant engendre des armatures transversale A_t . La démarche de calcul est comme suit :

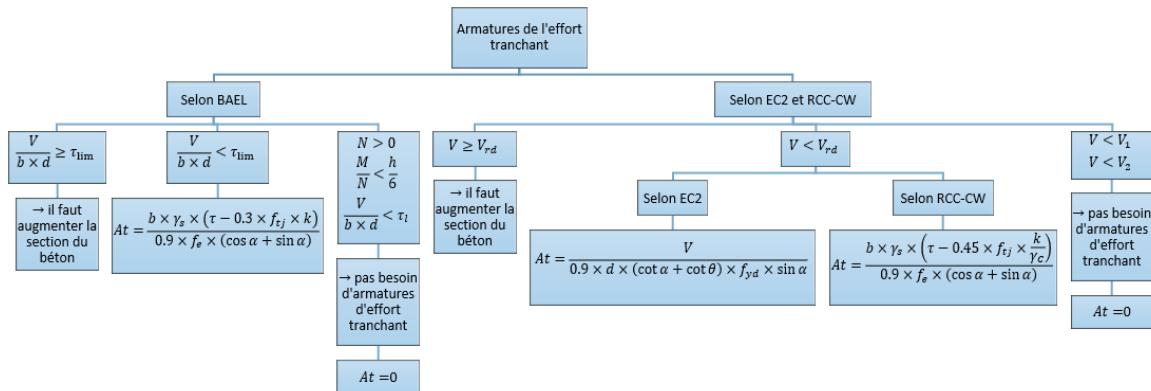


FIGURE 3.21 : Diagramme de calcul des armatures de l'effort tranchant à l'ELU et l'ELA

Avec :

- α : Angle de l'inclinaison des cadres

— θ : Angle de l'inclinaison des bielles

— $V_1 = (v_{\min} + K_1 \sigma_{cp}) bd$

— $V_2 = (C_{rdc} K \sqrt[3]{100 \rho_1 f_{ck}} + K_1 \sigma_{cp}) bd$

— $\tau_l = \min \left(150 \text{ MPa}, 6 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \right)$

— τ_{lim} :

- $\tau_{lim} = \min \left(500 \text{ MPa}, 20 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \right)$ si $\alpha = 90^\circ$ et fissuration peu préjudiciable
- $\tau_{lim} = \min \left(400 \text{ MPa}, 15 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \right)$ si $\alpha = 90^\circ$ et fissuration préjudiciable où très préjudiciable
- $\tau_{lim} = \min \left(700 \text{ MPa}, 27 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \right)$ si $\alpha = 45^\circ$

— k :

- $k = 1$ si $N=0$

- $k = 1 + 3 \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}$ si $N>0$

- $k = 1 - 10 \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}$ si $N<0$

— $\sigma_{cp} = \min \left(\frac{N}{hb}, 0.2 f_{cd} \right)$

— $V_{rd} = \frac{\alpha_{cw} v_1 b 0.9 f_{cd} (\cot \alpha + \cot \theta)}{1 + \cot^2 \theta}$

— α_{cw} :

- $\alpha_{cw} = 1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}$ si $\sigma_{cp} < 0$

- $\alpha_{cw} = 1$ si $\sigma_{cp} = 0$

- $\alpha_{cw} = 1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}$ si $0 < \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} < 0,25$

- $\alpha_{cw} = 1.25$ si $0,25 < \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} < 0,5$

- $\alpha_{cw} = 2,5 [1 - \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}]$ si $0,5 < \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} < 1$

— $v_1 = 0,6(1 - \frac{f_{ck}}{250})$

— $\nu_{min} = \frac{0.053}{\gamma_c} K^{\frac{2}{3}} f_{ck}^{\frac{1}{2}}$

— $K_1 = 0,15$

— $C_{rdc} = \frac{0.18}{\gamma_c}$

— $K = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$

— $\rho_1 = \min(0.02, \frac{\max(A_{sup}, A_{min})}{b*h})$

La sollicitation à prendre en compte dans le calcul de la torsion est seulement le moment de la torsion T.

La torsion engendre des armatures longitudinales A_{torl} et des armatures transversales A_{tort} .

La démarche de calcul est comme suit :

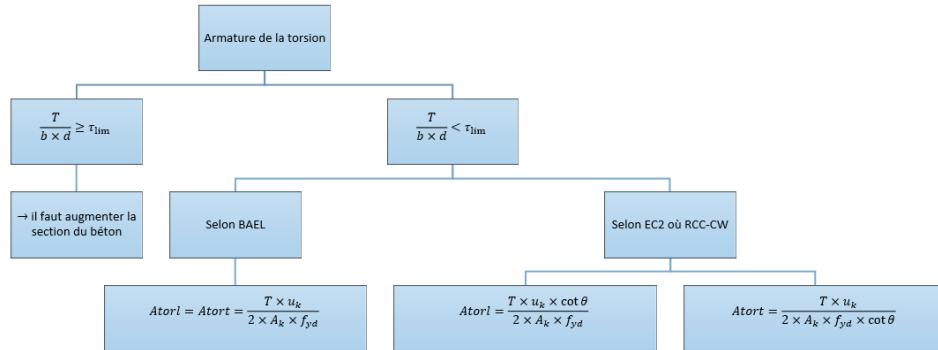


FIGURE 3.22 : Diagramme de calcul des armatures de torsion à l'ELU et l'ELA

Avec :

$$— u_k = 2 * (b + h - 2 * t_{ef})$$

$$— A_k = (b - t_{ef}) * (h - t_{ef})$$

$$— t_{ef} = \frac{b*h}{2*(b+h)}$$

3.5.3.2 Calcul des armatures à l'ELS

Les sollicitations à prendre en compte dans le calcul de la flexion composée sont l'effort normal N et le moment fléchissant M.

Le calcul est fait pour $M > 0$ en flexion composée. Pour le cas $M < 0$, on inverse les sections d'armatures supérieures et inférieures.

La flexion composée engendre des armatures longitudinales inférieures A_{inf} et des armatures longitudinales supérieurs A_{sup} si besoins.

La démarche de calcul est comme suit :

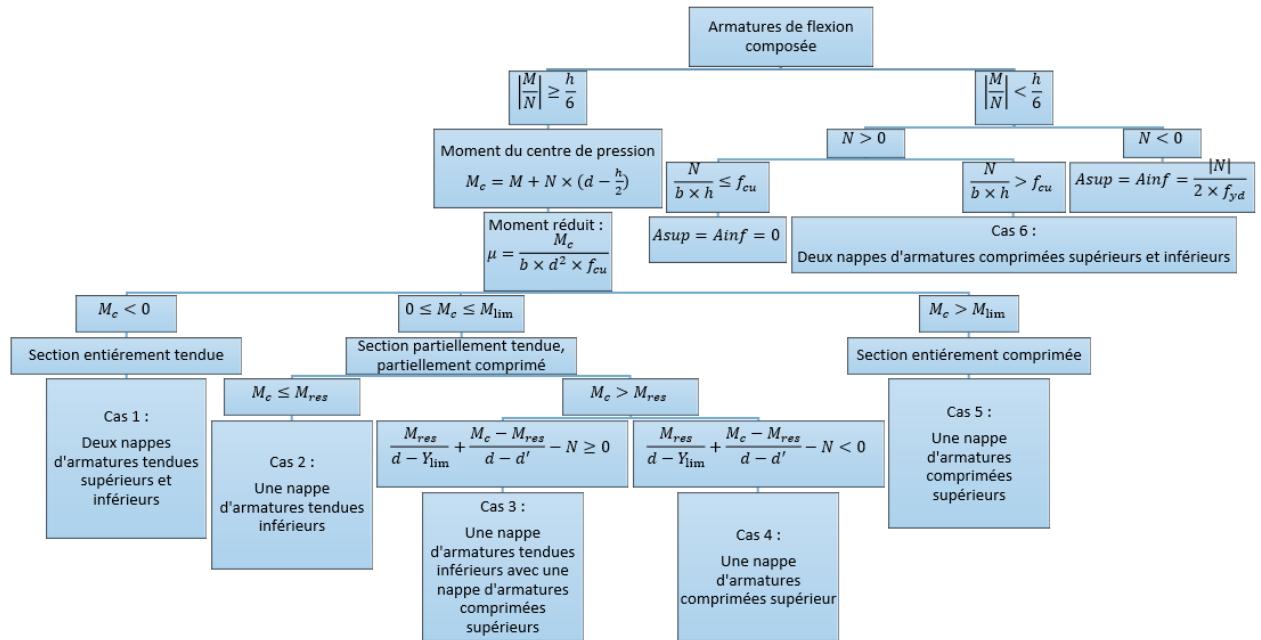


FIGURE 3.23 : Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELS

Avec :

- $M_{lim} = \frac{1}{3}bd^2\bar{\sigma}_c$
- $M_{res} = \frac{1}{2}b\bar{\sigma}_c Y_{lim} \left(d - \frac{Y_{lim}}{3} \right)$
- $Y_{lim} = d\alpha_{AB}$

La démarche de calcul du cas 1 est décrit ci-dessous :

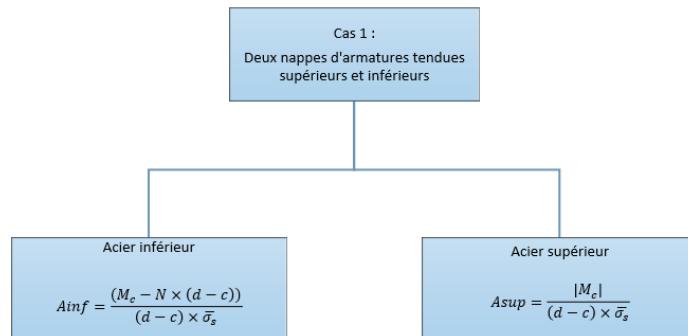


FIGURE 3.24 : Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELS du cas 1

Avec :

- $\bar{\sigma}_c$: contrainte limite de compression du béton à l'ELS
- $\bar{\sigma}_s$: contrainte limite de traction de l'acier à l'ELS

La démarche de calcul du cas 2 est décrit ci-dessous :

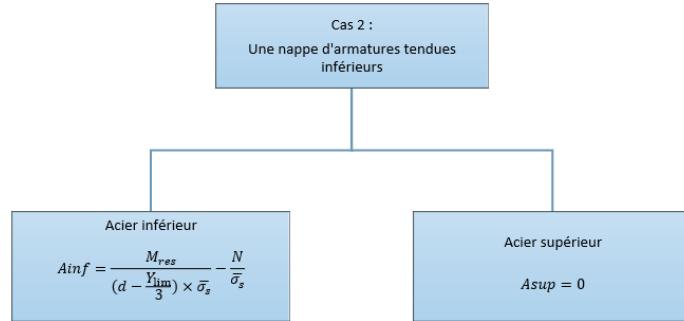


FIGURE 3.25 : Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELS du cas 2

La démarche de calcul du cas 3 est décrit ci-dessous :

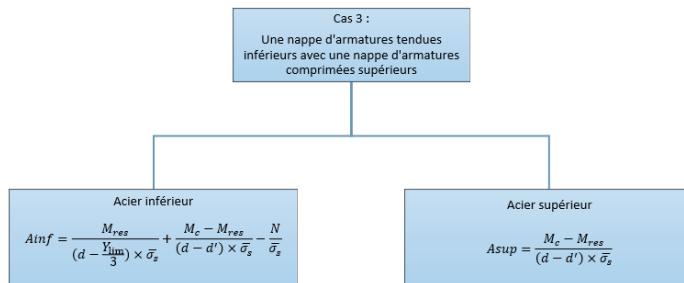


FIGURE 3.26 : Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELS du cas 3

La démarche de calcul du cas 4 est décrit ci-dessous :

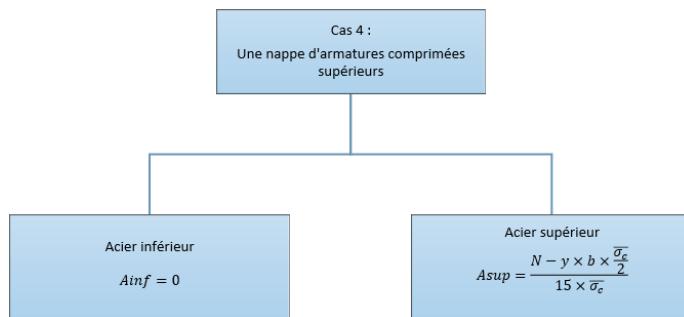


FIGURE 3.27 : Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELS du cas 4

Avec :

- On équilibre les moments par rapport aux armatures comprimées : $M'_c = N_b * z'$
- $N_b = 0.8y * b * \bar{\sigma}_c$
- $z' = \frac{1}{3} * y - d'$

On obtient : $y = \frac{3}{2} \sqrt{d'^2 + \frac{8}{3} \frac{-M+N(d-\frac{h}{2})}{b\sigma_c}}$

La démarche de calcul du cas 5 est décrit ci-dessous :

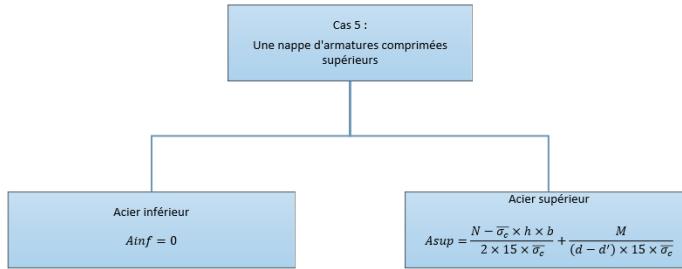


FIGURE 3.28 : Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELS du cas 5

La démarche de calcul du cas 6 est décrit ci-dessous :

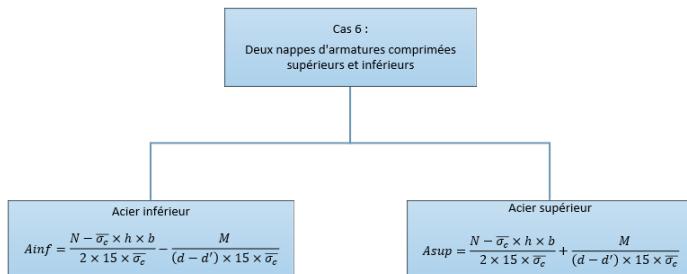


FIGURE 3.29 : Diagramme de calcul des armatures de flexion composée à l'ELS du cas 6

Pour la flexion simple, le principe des calculs est le même que celui de la flexion composée avec $N=0$.

La sollicitation à prendre en compte dans le calcul de la traction simple est l'effort normal N avec N négative.

La traction simple engendre des armatures longitudinales inférieures A_{inf} et des armatures longitudinales supérieurs A_{sup} identiques $A = A_{inf} = A_{sup}$.

La démarche de calcul est comme suit :

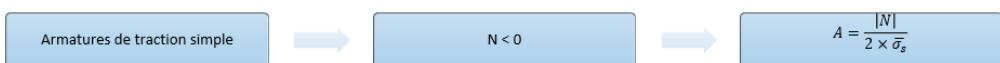


FIGURE 3.30 : Diagramme de calcul des armatures de traction simple à l'ELS

La sollicitation à prendre en compte dans le calcul de la compression simple est l'effort normal N avec N positive.

La compression simple engendre des armatures longitudinales inférieures A_{inf} et des armatures longitudinales supérieurs A_{sup} identiques $A = A_{inf} = A_{sup}$, si besoin.

La démarche de calcul est comme suit :

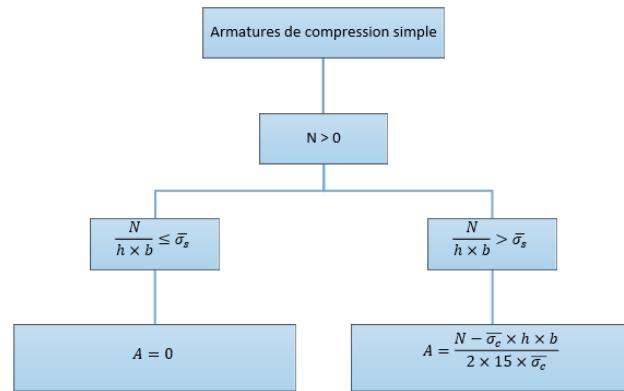


FIGURE 3.31 : Diagramme de calcul des armatures de compression simple à l'ELS

3.5.3.3 Section d'armatures minimales

L'utilisateur a la liberté d'effectuer les calculs avec considération ou non des sections d'acières minimales. Ce choix se fait en indiquant « oui » dans le fichier des données « fic.don » dans le propre endroit. Les sections d'armatures minimales longitudinaux sont calculées par la manière suivante :

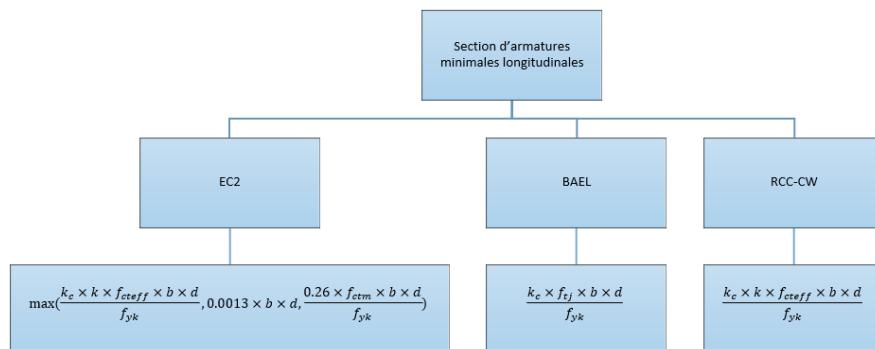


FIGURE 3.32 : Diagramme de calcul des armatures minimales longitudinales

Les sections d'armatures minimales transversales sont calculées par la manière suivante :

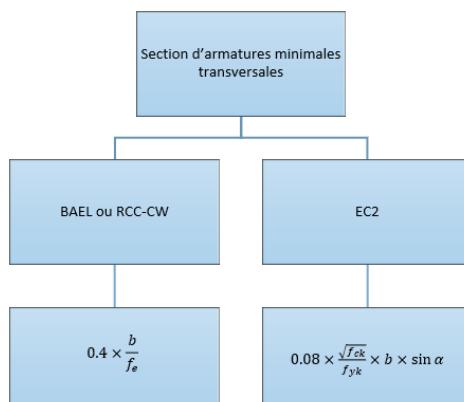


FIGURE 3.33 : Diagramme de calcul des armatures minimalles transversales

3.6 Tests de validation

3.6.1 Déroulement des tests de validation

Les tests de validation se déroulent en deux parties :

- Vérification des calculs des armatures longitudinales à l'ELU et l'ELS
- Vérification des calculs des armatures transversales à l'ELU.

La validation des tests se fait en comparant les résultats obtenus par **EKbeam** par les résultats obtenus par un outil de référence et un fichier « *Mathcad* ».

Un test est validé si l'écart entre les résultats obtenus par EKbeam par les résultats obtenus par l'outil de référence est très faible.

3.6.2 Grille des tests de validation

Les tableaux suivants décrivent les tests de validations en ce qui concerne les armatures longitudinales et les armatures transversales en EC2, BAEL et RCC-CW :

TABLEAU 3.3 : Grille des tests de validation

Tests concernant les armatures longitudinales – EC2, BAEL, RCC-CW	
Nom	Détail
Test 1	Calcul section en flexion composée en traction à l'ELU
Test 2	Calcul section en flexion composée en traction à l'ELS
Test 3	Calcul section en flexion composée en compression sans armatures comprimées à l'ELU
Test 4	Calcul section en flexion composée en compression sans armatures comprimées à l'ELS
Test 5	Calcul section en flexion composée en compression avec armatures comprimées à l'ELU
Test 6	Calcul section en flexion composée en compression avec armatures comprimées à l'ELS
Test 7	Calcul section en flexion composée en compression avec deux nappes d'armatures comprimées à l'ELU
Test 8	Calcul section en flexion dominée en traction à l'ELU
Test 9	Calcul section en flexion dominée en traction à l'ELS
Test 10	Calcul section en flexion dominée en compression sans armatures comprimées à l'ELU
Test 11	Calcul section en flexion dominée en compression sans armatures comprimées à l'ELS
Test 12	Calcul section en flexion dominée en compression avec armatures comprimées à l'ELU

Test 13	Calcul section en flexion dominée en compression avec armatures comprimées à l'ELS
Test 14	Calcul section en traction simple à l'ELU
Test 15	Calcul section en traction simple à l'ELS
Test 16	Calcul section en compression simple sans besoin d'armatures comprimées à l'ELU
Test 17	Calcul section en compression simple sans armatures comprimées à l'ELS
Test 18	Calcul section en compression simple avec besoin d'armatures comprimées à l'ELU
Test 19	Calcul section en compression simple avec armatures comprimées à l'ELS
Test 20	Calcul section en torsion sans écrasement des bielles à l'ELU
Test 21	Calcul section en torsion avec écrasement des bielles à l'ELU
Tests concernant les armatures transversales – EC2, BAEL, RCC-CW	
Nom	Détail
Test 22	Calcul section en effort tranchant sans écrasement des bielles à l'ELU
Test 23	Calcul section en effort tranchant avec écrasement des bielles à l'ELU
Test 24	Calcul section en effort tranchant sans besoin d'armatures transversales à l'ELU (EC2)
Test 25	Calcul section en torsion sans écrasement des bielles à l'ELU
Test 26	Calcul section en torsion avec écrasement des bielles à l'ELU

3.6.3 Validaion des tests

On définit la section en béton suivante :

- $b = 0.8m$
- $h = 1.0m$
- $c = 0.03m$
- $c' = 0.03m$

On choisit les paramètres de calculs suivants :

- Béton : 30 MPa
- Acier : A, 500 MPa

La validation est faite en tenant compte des aciers comprimés sans les aciers minimaux.

La comparaison des résultats est détaillée dans l'annexe.

Les résultats montrent que les sections d'acières calculés par l'outils **EKbeam** sont cohérentes

avec les sections d'aciels calculé par l'outils de référence. Ces résultats permettent la validation de l'outils de calcul **EKbeam** pour tous les cas de test.

3.7 Exemple de calcul

Un exemple de calcul est détaillé dans l'annexe.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons démontré que l'outil **EKbeam** développé dans **EKIUM** est validé et prêt à l'emploi.

Chapitre 4

EKFER

Plan

1	Introduction	41
2	Description de l'outil	41
3	Objet de l'outil	41
4	Fonctionnement de l'outil	41
5	Méthode de calcul	44
6	Tests de validation	47
7	Exemple de calcul	48
8	Conclusion	48

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous introduisons l'outil de calcul **EKfer**, son but et la façon dont il fonctionne.

Nous décrivons également les méthodes de calcul que nous avons utilisées pour élaborer cet outil ainsi que les étapes de sa validation.

4.2 Description de l'outil

EKfer est un outil de calcul de ferraillage des éléments de plaques ou de coques développé par l'entreprise **EKIUM** sous le langage *Python 3* (solveur) et *APDL* (données d'entrée et affichage des résultats).

Le fonctionnement de cet outil nécessite des données d'entrée issues du logiciel *ANSYS* (numéros de barres, géométrie, efforts, etc.).

4.3 Objet de l'outil

L'objet de l'outils **EKfer** est de calculer les armatures longitudinales et transversales dans les éléments de plaques et de coques en béton.

Les calculs sont réalisés conformément aux règles suivantes (au choix de l'utilisateur) :

- BAEL [2]
- EC2 [3]
- RCC-CW [4]

Les calculs sont réalisés soit à l'ELU, soit à l'ELA, soit à l'ELS (au choix de l'utilisateur) :

- À l'ELU et l'ELA, les armatures longitudinales et transversales sont calculées
- À l'ELS, seules les armatures longitudinales sont calculées pour BAEL et EC2, pour RCC-CW les armatures longitudinales et transversales sont calculées.

L'outil **EKfer** exige des données et fournit les mêmes fichiers que **EKbeam**, voir 3.3.

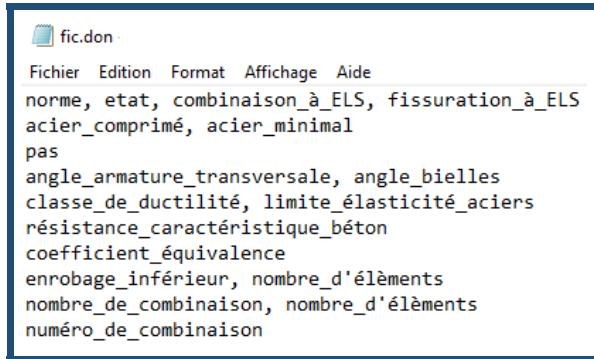
4.4 Fonctionnement de l'outil

D'une façon similaire à celle de **EKbeam**, pour lancer l'outil **EKfer**, on doit utiliser le logiciel *ANSYS*, il suffit de taper "*ekfer*", le nom de l'outil, dans la barre de commande de *ANSYS*.

Tout d'abord, avant de lancer **EKfer**, il faut s'assurer que le fichier contenant les données et les paramètres de calcul « *fic.don* » existe dans le même répertoire que le fichier « *.db* » et *EKfer.exe*.

4.4.1 Fichiers de données

Le fichier de données « *fic.don* » doit comporter $[8 + \text{nombre de combinaisons de charge à traiter}]$ lignes. Le fichier de données doit prendre la forme suivante :



```

fic.don
Fichier Edition Format Affichage Aide
norme, etat, combinaison_à_ELS, fissuration_à_ELS
acier_comprimé, acier_minimal
pas
angle_armature_transversale, angle_bielles
classe_de_ductilité, limite_elasticité_aciers
résistance_caractéristique_béton
coefficients équivalence
enrobage_inférieur, nombre_d'éléments
nombre_de_combinaison, nombre_d'éléments
numéro_de_combinaison

```

FIGURE 4.1 : Forme du fichier de données « *fic.don* »

Il s'agit du même fichier « *fic.don* » de **EKbeam**, voir 3.4.1, avec :

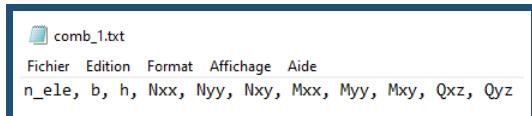
- pas : le pas d'angle de l'inclinaison des éléments par rapport à l'axe horizontal

4.4.2 Fichier de combinaisons

L'outil **EKfer**, en fonction des données d'entrée, crée des fichiers de combinaisons sous le nom « *comb_i* » contenant la géométrie et les efforts.

Un fichier de combinaison de charges « *comb_i* » doit comporter [nombre_d'éléments] lignes.

Le fichier de combinaison a la forme suivante :



```

comb_1.txt
Fichier Edition Format Affichage Aide
n_ele, b, h, Nxx, Nyy, Nxy, Mxx, Myy, Mxy, Qxz, Qyz

```

FIGURE 4.2 : Forme du fichier de données « *comb_i* »

- n_ele : numéro de l'élément
- h : hauteur de l'élément (m)
- b : largeur de l'élément (m)
- Nxx : effort normal suivant l'axe (x)
- Nyy : effort normal suivant l'axe (y)

- N_{xy} : effort tangentiel
- M_{xx} : moment fléchissant suivant l'axe (x)
- M_{yy} : moment fléchissant suivant l'axe (y)
- M_{xy} : moment de torsion
- Q_{xz} : effort tranchant suivant l'axe (x)
- Q_{zy} : effort tranchant suivant l'axe (y)

4.4.3 Fichier de résultats

Après l'exécution d'**EKfer**, un fichier résultats de type « *Résultat de calcul .txt* » est créé.

Chaque ligne du fichier de résultat a la forme suivante :

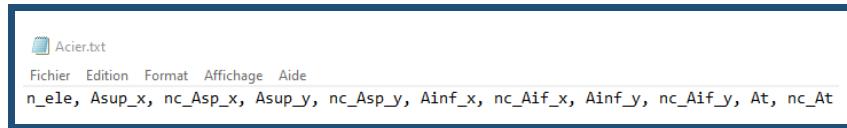


FIGURE 4.3 : Forme du fichier de résultats « *Résultat de calcul* »

- n_ele : numéro de l'élément
- $Asup_z$: section d'armatures longitudinales supérieures selon l'axe (x)
- nc_Afp_x : numéro de combinaison dimensionnante pour la section $Asup_x$
- $Asup_y$: section d'armatures longitudinales supérieures selon l'axe (y)
- nc_Afp_y : numéro de combinaison dimensionnante pour la section $Asup_y$
- $Ainf_x$: section d'armatures longitudinales inférieures selon l'axe (x)
- nc_Afp_x : numéro de combinaison dimensionnante pour la section $Ainf_x$
- $Ainf_y$: section d'armatures longitudinales inférieures selon l'axe (y)
- nc_Afp_y : numéro de combinaison dimensionnante pour la section $Ainf_y$
- At : section d'armatures transversales
- nc_At : numéro de combinaison dimensionnante pour la section At

Le fichier « *Résultat de calcul.txt* » est lu par le logiciel « *ANSYS* » afin de présenter les résultats en format « *ETABLE* », ce qui permet à l'utilisateur d'extraire des tableaux et d'afficher les cartographies de ferraillage.

Une valeur de 9999 dans les résultats veut dire que la section du béton est insuffisante et qu'il faut la redimensionner.

4.4.4 Fichier de récapitulation des données

Lors du calcul, l'outil **EKfer** crée aussi un fichier récapitulatif des données renseignées par l'utilisateur « *Récapitulation des données.txt* ». Le fichier récapitulatif prend l'allure suivante :

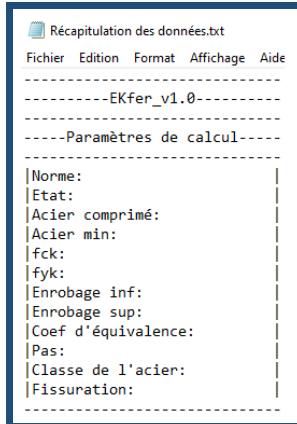


FIGURE 4.4 : Forme du fichier de récapitulation « *Récapitulation des données* »

4.4.5 Message d'erreur

EKfer affiche le même message d'erreur (voir la figure suivante) que **EKbeam** pour la même condition : classe rentrée est différente des valeurs suivantes : 55, 60, 70, 80, 90 MPa si le calcul est requis pour des valeurs f_{ck} supérieures à 50MPa.



FIGURE 4.5 : Forme du message d'erreur

4.5 Méthode de calcul

La méthode, nommée méthode de **CAPRA-MAURY** [14] est fondée sur le principe de l'équilibre de chacune des facettes centrées au point de calcul et dont la normale tourne dans le plan tangent au feuillet moyen. Il s'agit d'un post-traitement d'un calcul statique d'une plaque ou d'une coque en béton armé à partir des efforts précédemment obtenus.

Pour chaque position (selon le pas introduit par l'utilisateur) de la facette, on effectue un calcul de section rectangulaire en béton armé et on en déduit les deux sections d'armatures supérieure et inférieure, de la même manière que **EKbeam**, voir 3.5.

Ces deux sections sont ensuite recalées en deux sections suivant l'axe X (AXS pour la nappe supérieure et AXI pour la nappe inférieure) et deux sections (par unité de longueur) suivant l'axe Y (AYI pour la nappe supérieure et AYS pour la nappe inférieure).

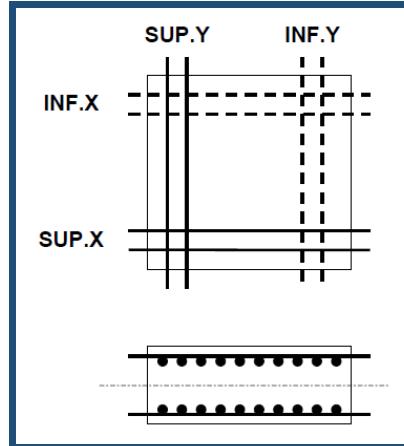


FIGURE 4.6 : Répartition des armatures dans une facette

En effet, à l'aide d'un algorithme adapté, on procède à la recherche de la section optimale pour chaque nappe (inférieure et supérieure) correspondant respectivement à la valeur minimum de la somme $AI = AXI + AYI$ et $AS = AXS + AYS$.

4.5.1 Efforts

On définit un ensemble de facettes, centrées au point de calcul, dont la normale tourne dans le plan tangent au feuillet moyen. La facette est repérée par l'angle θ que fait sa normale avec l'axe Ox du repère de l'élément (voir la figure suivante). L'angle θ est discrétisé régulièrement de 0° à 180° par un pas, généralement avec un pas de 5° ou de 10° , choisi par l'utilisateur. Les axes Ox et Oy sont les axes des nappes d'armatures.

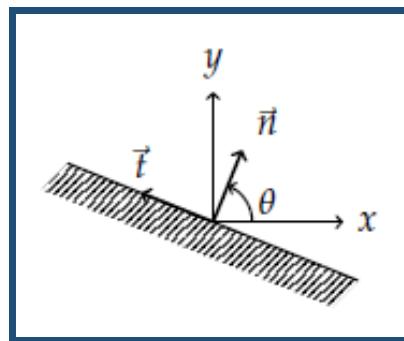


FIGURE 4.7 : Facette avec un angle θ par rapport à l'axe Ox

Pour chacune de ces facettes, on évalue le moment de flexion M , l'effort normal N et l'effort tranchant Q qui s'y appliquent en fonction des efforts à l'aide des équations :

$$M = M_{xx} \cos^2(\theta) + M_{yy} \sin^2(\theta) - 2M_{xy} \sin(\theta) \cos(\theta)$$

$$N = N_{xx} \cos^2(\theta) + N_{yy} \sin^2(\theta) - 2N_{xy} \sin(\theta) \cos(\theta)$$

Pour le calcul de Q , il dépend du norme :

— BAEL :

$$Q = \sqrt{Q_{xz}^2 + Q_{yz}^2}$$

— EC2 ou RCC-CW :

$$Q = Q_{xz} \cos(\theta) + Q = Q_{yz} \sin(\theta)$$

Les actions sont représentés dans la figure suivante :

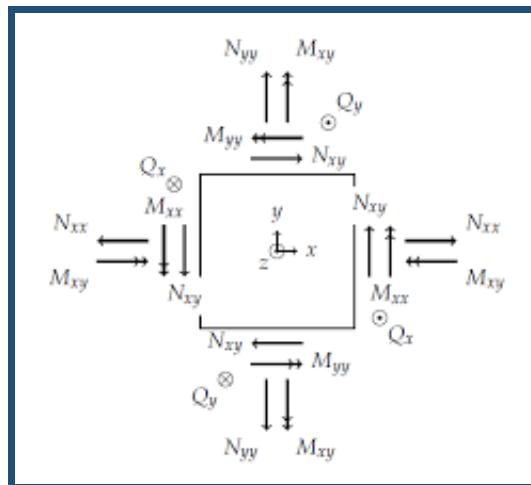


FIGURE 4.8 : Efforts dans une facette

4.5.2 Calcul béton armé

Le calcul béton armé pour cet outil est identique au calcul utilisé pour l'outil **EKbeam** dans le chapitre 3.5.2.

4.5.3 Calcul des armatures

Les armatures sont calculées selon le même principe dans **EKfer** que dans **EKbeam**, voir le chapitre 3.5.3.

En ce qui concerne l'algorithme utilisé pour le calcul des aciers longitudinales pour chaque nappe, il s'agit d'une optimisation faite sur les valeurs AI et AS calculées par l'outil. Puis l'outil recherche les valeurs AXI , AYI , AXS et AYS grâce à la bibliothèque $CVXPY$ intégrée dans *Python*. [9] Cet outil prend comme variable d'entrée une matrice contenant les valeurs des armatures calculées, inférieures ou supérieures, pour les valeurs de θ et fournit en sortie deux matrices contenant les valeurs des armatures à retenir selon les axes (x) et (y) respectivement. Cet algorithme s'exécute sur chaque élément. [14]

Le calcul des sections d'armatures minimales de **EKfer** correspond à celui de **EKbeam**, voir le chapitre 3.5.3.3.

4.6 Tests de validation

4.6.1 Déroulement des tests de validation

Pour l'outil **EKfer**, nous nous concentrons essentiellement sur la validation des résultats issus de l'algorithme d'optimisation, étant donné que nous avons déjà validé les calculs au chapitre 3.6.

La validation se fait en comparant les résultats obtenus par **EKfer** par les résultats obtenus par un outil de référence, le logiciel « *Robot Structural Analysis* ». [15]

Un test est validé si l'écart entre les résultats obtenus par EKbeam par les résultats obtenus par l'outil de référence est très faible.

4.6.2 Grille des tests de validation

On a choisi de partir avec l'exemple d'un cadre en béton armé : une dalle appuyée sur deux voiles.

On définit la section en béton suivante :

— Dalle :

- $L = 4m$
- $b = 0,2m$
- $h = 4m$
- $c = 0,04m$
- $c' = 0,04m$
- Pas de l'angle : 10

— **Voiles** :

- $L = 4m$
- $b = 0,2m$
- $h = 2,7m$
- $c = 0,04m$
- $c' = 0,04m$
- Pas de l'angle : 10

On choisit les paramètres de calculs suivants :

- Norme : EC2
- Etat : ELU
- Béton : 35 MPa
- Acier : A, 500 MPa
- Maillage : 0.5m

On définit le cas de charge suivant :

- Une charge de pression uniforme appliquée sur la dalle : $0.05MN/m^2$
- Une charge de pression uniforme appliquée sur une voile : $0.03MN/m^2$

4.6.3 Validaion des tests

La validation est faite en tenant compte des aciers comprimés sans les aciers minimaux.

La comparaison des résultats est détaillée dans l'annexe.

Les résultats montrent que les sections d'acières calculés par l'outils **EKfer** sont cohérentes avec les sections d'acières calculé par l'outils de référence. Ces résultats permettent la validation de l'outils de calcul **EKfer** pour tous les cas de test.

4.7 Exemple de calcul

Un exemple de calcul est détaillé dans l'annexe.

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons démontré que l'outil **EKfer** développé dans **EKIUM** est validé et prêt à l'emploi.

Chapitre 5

EKFOND

Plan

1	Introduction	50
2	Description de l'outil	50
3	Objet de l'outil	50
4	Fonctionnement de l'outil	50
5	Méthode de calcul	60
6	Tests de validation	69
7	Conclusion	71

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous introduisons l'outil de calcul **EKfond**, son but et la façon dont il fonctionne.

Nous décrivons également les méthodes de calcul que nous avons utilisées pour élaborer cet outil ainsi que les étapes de sa validation.

5.2 Description de l'outil

EKfond est un outil de calcul et de dimensionnement des fondations profondes, en particulier les pieux, développé par **EKIUM** sous le langage « *Python 3* ».

5.3 Objet de l'outil

L'objet de l'outil **EKfond** est de calculer la capacité portante d'un pieu ainsi que de vérifier le béton en compression.

Les calculs sont réalisés conformément aux règles suivantes :

- EC7 [16]
- NF P94-262 [6]

Les vérifications de la compression du béton sont réalisées à l'ELS.

L'outil **EKfond** requiert en entrée :

- Un fichier « *Sondages.txt* » contenant les paramètres et les résultats des sondages effectués dans le terrain
- Un fichier « *Fondation.txt* » contenant les caractéristiques du pieu à réaliser
- Un fichier « *Charges.txt* » contenant les sollicitations, en compression et en traction, agissant sur le pieu

L'outil **EKfond** fournit en sortie :

- Un fichier résultats au format « *.txt* »
- Des graphes décrivant chaque sondage

5.4 Fonctionnement de l'outil

Pour exécuter l'outil **EKfond**, il suffit de lancer le fichier « *EKfond.exe* ».

Tout d'abord, il faut s'assurer que tous les fichiers contenant les données et les paramètres de calcul ; « *Sondages.txt* », « *Fondation.txt* » et « *Charges.txt* » ; existent dans le même répertoire que « *EKfond* » et qu'ils soient sous la bonne forme.

5.4.1 Fichiers de données

Le fichier de données « *Sondages.txt* » fournit les caractéristiques du sol à partir des résultats des essais effectués sur le terrain.

Ce fichier doit comporter [2+ nombre de sondages * (nombre de couches+1)] lignes.

Le fichier des sondages doit suivre la forme suivante :

```
Sondages.txt
Fichier Edition Format Affichage Aide
type_modele
surface_investigation
nombre_sondage
nombre_couche
[profondeur_couche pression_limite_nette_couche module_pressiométrique formation_couche]*nombre_couche
```

FIGURE 5.1 : Forme du fichier de données « *Sondage* »

□ *Ligne 1*

- type_modele : type de la procédure utilisée pour le calcul :
 - 1 : Modèle de terrain
 - 2 : Modèle de pieu

□ *Ligne 2*

- surface_investigation : la surface d'investigations géotechniques dans le cas de calcul en procédures « modèle de pieu », sinon 0 pour « modèle de terrain ».

□ *Ligne 3*

- profondeur_couche : la profondeur de chaque couche par rapport au terrain naturelle, exprimé en mètre
- pression_limite_nette_couche : la pression limite nette par couche, exprimé en MPa
- module_pressiométrique : le module pressiométrique de chaque couche, exprimé en MPa
- formation_couche : la formation de chaque couche :
 - 1 : Argile et Limons
 - 2 : Sols intermédiaires

- 3 : Sable Grave
- 4 : Craie
- 5 : Marne et Calcaire-Marneux
- 6 : Roche altérée où fragmentée

Le fichier de données « *Fondation.txt* » fournit les caractéristiques des pieux à réalisés.

Ce fichier doit comporter 5 lignes. Le fichier de fondation doit suivre la forme suivante :



```

Fondation.txt
Fichier Edition Format Affichage Aide
classe_fondation
categorie_fondation
refoulement
longeur_pieu cote_pieu longeur_frottement_négigeable module_yong diametre
fck

```

FIGURE 5.2 : Forme du fichier de données « *Fondation* »

□ *Ligne 1*

— classe_fondation : la classe du pieu utilisée :

- 1 : Pieux forés
- 2 : Pieux forés tarière creuse
- 3 : Pieux vissés
- 4 : Pieux battus fermés
- 5 : Pieux battus acier ouvert
- 6 : Profilés H battus
- 7 : Palplanches battues
- 8 : Micropieu

□ *Ligne 2*

— categorie_fondation : la catégorie du pieu utilisé :

- 1 : Foré simple (pieux et barrettes)
- 2 : Foré boue (pieux et barrettes)
- 3 : Foré tubé (virole perdue)
- 4 : Foré tubé (virole récupérée)
- 5 : Foré simple ou boue avec rainurage ou puits

- 6 : Foré tarière continue simple rotation ou double rotation
- 7 : Vissé moulé
- 8 : Vissé tubé
- 9 : Battu béton préfabriqué ou précontraint
- 10 : Battu enrobé (béton, mortier, coulis)
- 11 : Battu moulé
- 12 : Battu acier fermé
- 13 : Battu acier ouvert
- 14 : H battu
- 15 : H battu injecté IGU ou IRS
- 16 : Palplanches battues
- 17 : Micropieu type I
- 18 : Micropieu type II
- 19 : Pieu ou micropieu injecté (type III)
- 20 : Pieu ou micropieu injecté (type IV)

□ *Ligne 3*

- refoulement :
 - 0 : sans refoulement
 - 1 : avec refoulement

□ *Ligne 4*

- longeur_pieu : la longueur du pieu, exprimé en mètre
- longeur_frottement_négigeable : la longueur à partir de laquelle on néglige les frottements, exprimé en mètre
- cote_pieu : la cote du pieu, exprimé en mètre
- module_young : le module de Young, exprimé en MPa
- diametre : le diamètre du pieu, exprimé en mètre

□ *Ligne 5*

- fck : la résistance caractéristique du béton utilisé, exprimée en MPa

Le fichier de données « *Charge.txt* » fournit les sollicitations en compression et en traction agissant sur la fondation.

Ce fichier doit comporter 5 lignes. Le fichier des charges doit suivre la forme suivante :

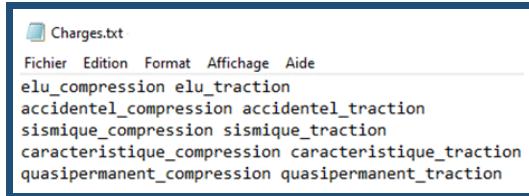


FIGURE 5.3 : Forme du fichier de données « *charge* »

□ **Ligne 1**

- elu_compression : Sollicitation à l'ELU en compression
- elu_traction : Sollicitation à l'ELU en traction

□ **Ligne 2**

- accidentel_compression : Sollicitation accidentelle à l'ELU en compression
- accidentel_traction : Sollicitation accidentelle à l'ELU en traction

□ **Ligne 3**

- sismique_compression : Sollicitation sismique à l'ELU en compression
- sismique_traction : Sollicitation sismique à l'ELU en traction

□ **Ligne 4**

- caracteristique_compression : Sollicitation caractéristique à l'ELS en compression
- caracteristique_traction : Sollicitation caractéristique à l'ELS en traction

□ **Ligne 5**

- quasipermanent_compression : Sollicitation quasi-permanente à l'ELS en compression
- quasipermanent_traction : Sollicitation quasi-permanente à l'ELS en traction

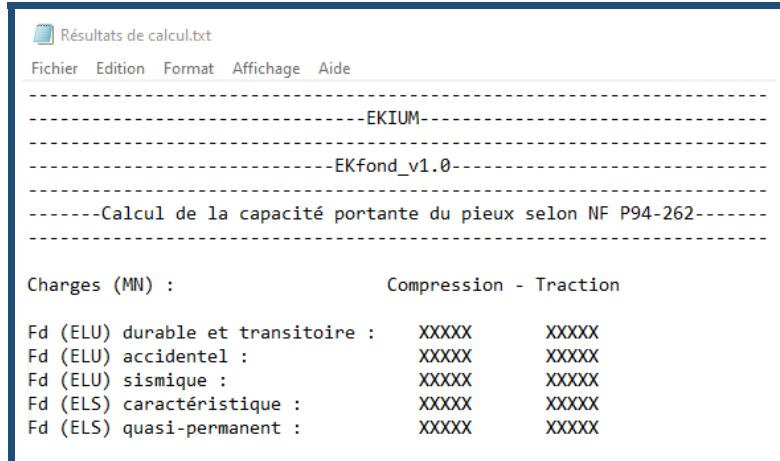
5.4.2 Fichiers des résultats

Après l'exécution de l'outil, **EKFond** lit les trois fichiers d'entrée et commence son processus.

Ce processus se termine par la création d'un répertoire « *Résultats* » qui contient un fichier des résultats de type « .txt » appelé « *Résultats de calcul.txt* » et des fichiers de type image appelés « *Alpha,pieu-sol.png* », « *kp.png* », « *qs.png* », « *Rb.png* », « *Rs.png* » et « *Sondage.png* ».

Le fichier des résultats comporte trois parties.

La première partie représente les charges déjà introduit dans le fichier « *Charges* ». Cette partie suit la forme suivante :



```

Résultats de calcul.txt
Fichier Edition Format Affichage Aide
-----
-----EKIUM-----
-----EKfond_v1.0-----
-----Calcul de la capacité portante du pieux selon NF P94-262-----
-----
Charges (MN) : Compression - Traction
Fd (ELU) durable et transitoire : XXXXX XXXXX
Fd (ELU) accidentel : XXXXX XXXXX
Fd (ELU) sismique : XXXXX XXXXX
Fd (ELS) caractéristique : XXXXX XXXXX
Fd (ELS) quasi-permanent : XXXXX XXXXX

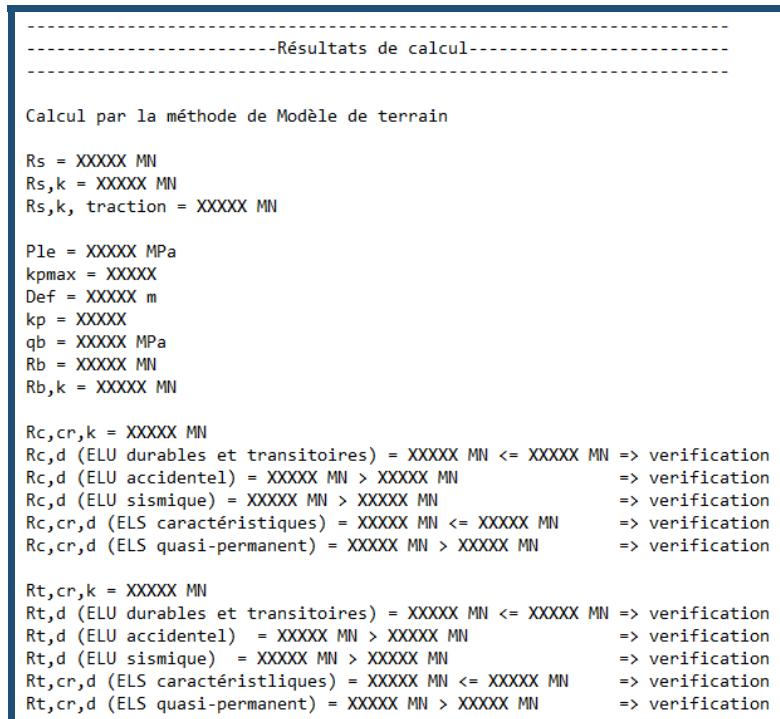
```

FIGURE 5.4 : Forme du fichier de résultats représentant les charges

Avec XXXXX sont les valeurs des sollicitations pour chaque situation, exprimées en MN.

La deuxième partie présente les résultats de calculs. On distingue deux procédures de calcul, procédure par terrain et procédure par pieu, donc on a deux cas d'affichage selon la procédure.

Pour la procédure de terrain, cette partie suit la forme suivante :



```

-----
-----Résultats de calcul-----
-----
Calcul par la méthode de Modèle de terrain
Rs = XXXXX MN
Rs,k = XXXXX MN
Rs,k, traction = XXXXX MN

Ple = XXXXX MPa
kpmax = XXXXX
Def = XXXXX m
kp = XXXXX
qb = XXXXX MPa
Rb = XXXXX MN
Rb,k = XXXXX MN

Rc,cr,k = XXXXX MN
Rc,d (ELU durables et transitoires) = XXXXX MN <= XXXXX MN => verification
Rc,d (ELU accidentel) = XXXXX MN > XXXXX MN => verification
Rc,d (ELU sismique) = XXXXX MN > XXXXX MN => verification
Rc,cr,d (ELS caractéristiques) = XXXXX MN <= XXXXX MN => verification
Rc,cr,d (ELS quasi-permanent) = XXXXX MN > XXXXX MN => verification

Rt,cr,k = XXXXX MN
Rt,d (ELU durables et transitoires) = XXXXX MN <= XXXXX MN => verification
Rt,d (ELU accidentel) = XXXXX MN > XXXXX MN => verification
Rt,d (ELU sismique) = XXXXX MN > XXXXX MN => verification
Rt,cr,d (ELS caractéristiques) = XXXXX MN <= XXXXX MN => verification
Rt,cr,d (ELS quasi-permanent) = XXXXX MN > XXXXX MN => verification

```

FIGURE 5.5 : Forme du fichier de résultats présentant les résultats de calculs - procédure de terrain

Avec :

- $\underline{R_s}$: la résistance de frottement axial, exprimée en MN
- $\underline{R_{s,k}}$: la résistance de frottement axial caractéristique en compression, exprimée en MN
- $\underline{R_{s,k, traction}}$: la résistance de frottement axial caractéristique en traction, exprimée en MN
- $\underline{P_{le}}$: la pression limite nette équivalente, exprimée en MPa
- $\underline{k_{pmax}}$: le facteur de portance pressiométrique maximum
- \underline{Def} : la hauteur d'encastrement effective, exprimée en mètre
- $\underline{k_p}$: le facteur de portance pressiométrique
- $\underline{q_b}$: la pression de rupture, exprimé en MPa
- $\underline{R_b}$: la résistance de pointe, exprimée en MN
- $\underline{R_{b,k}}$: la Résistance de pointe caractéristique, exprimée en MN
- $\underline{R_{c,cr,k}}$: la valeur caractéristique de la charge de fluage en compression, exprimé en MN
- $\underline{R_{c,d} (ELU \ durable \ et \ transitoire)}$: la portance en compression de la fondation à l'ELU , exprimée en MN
- $\underline{R_{c,d} (ELU \ accidentel)}$: la portance en compression de la fondation à l'ELA, exprimée en MN
- $\underline{R_{c,d} (ELU \ sismique)}$: la portance en compression de la fondation à l'ELA sismique, en MN
- $\underline{R_{c,cr,d} (ELS \ caractéristique)}$: la charge de fluage en compression à l'ELS C, en MN
- $\underline{R_{c,cr,d} (ELS \ quasi-permanent)}$: la charge de fluage en compression à l'ELS Q-P, en MN
- $\underline{R_{t,cr,k}}$: la valeur caractéristique de la charge de fluage en traction, en MN
- $\underline{R_{t,d} (ELU \ durable \ et \ transitoire)}$: la résistance en traction de la fondation à l'ELU , exprimée en MN
- $\underline{R_{t,d} (ELU \ accidentel)}$: la résistance en traction de la fondation à l'ELA, exprimée en MN
- $\underline{R_{t,d} (ELU \ sismique)}$: la résistance en traction de la fondation à l'ELA sismique, en MN
- $\underline{R_{t,cr,d} (ELS \ caractéristique)}$: la charge de fluage en traction à l'ELS C, exprimée en MN
- $\underline{R_{t,cr,d} (ELS \ quasi-permanent)}$: la charge de fluage en traction à l'ELS Q-P, exprimée en MN
- $\underline{verification}$:
 - OK : si la condition est vérifiée
 - PAS OK : si la condition n'est pas vérifiée

Pour la procédure de pieu, cette partie suit la forme suivante :

```

----- Résultats de calcul -----
----- Calcul par la procédure de Modèle de pieu -----



Rs,moyenne = XXXXX MN
Rs,min = XXXXX MN
Rb,moyenne = XXXXX MN
Rb,min = XXXXX MN
Rc,moyenne = XXXXX MN
Rc,min = XXXXX MN
Rck = XXXXX MN
Rtk = XXXXX MN
Rsk = XXXXX MN
Rbk = XXXXX MN

Rc,d (ELU durables et transitoires) = XXXXX MN <= XXXXX MN => verification
Rc,d (ELU accidentel) = XXXXX MN > XXXXX MN => verification
Rcd,sismique = XXXXX MN > XXXXX MN => verification

Rc,cr,k = XXXXX MN
Rc,cr,d (ELS caractéristiques) = XXXXX MN <= XXXXX MN => verification
Rc,cr,d (ELS quasi-permanent) = XXXXX MN > XXXXX MN => verification

Rt,d (ELU durables et transitoires) = XXXXX MN <= XXXXX MN => verification
Rt,d (ELU accidentel) = XXXXX MN > XXXXX MN => verification
Rtd,sismique = XXXXX MN > XXXXX MN => verification

Rt,cr,k = XXXXX MN
Rt,cr,d (ELS caractéristiques) = XXXXX MN <= XXXXX MN => verification
Rt,cr,d (ELS quasi-permanent) = XXXXX MN > XXXXX MN => verification

```

FIGURE 5.6 : Forme du fichier de résultats présentant les résultats de calculs - procédure de pieu

Avec :

- *Rs,moyenne* : la résistance moyenne de frottement axial, exprimée en MN
- *Rs,min* : la résistance minimal de frottement axial, exprimée en MN
- *Rb,moyenne* : la résistance moyenne de pointe, exprimée en MN
- *Rb,min* : la résistance minimal de pointe, exprimée en MN
- *Rc,moyenne* : la valeur moyenne de la portance, exprimée en MN
- *Rc,moyenne* : la valeur moyenne de la portance, exprimée en MN
- *Rc,min* : la valeur minimal de la portance, exprimée en MN
- *Rck* : la valeur caractéristique de la portance en compression, exprimé en MN
- *Rtk* : la valeur caractéristique de la portance en traction, exprimé en MN
- *Rsk* : la résistance de frottement axial caractéristique, exprimée en MN
- *Rbk* : la Résistance de pointe caractéristique, exprimée en MN
- *Rc,d (ELU durables et transitoires)* : la portance en compression de la fondation à l'ELU fondamentale, exprimée en MN

- Rc,d (ELU accidentel) : la portance en compression de la fondation à l'ELA, exprimée en MN
- Rc,d (ELU sismique) : la portance en compression de la fondation à l'ELA sismique, en MN
- Rc,cr,k : la valeur caractéristique de la charge de fluage en compression, exprimé en MN
- Rc,cr,d (ELS caractéristiques) : la charge de fluage en compression à l'ELS C, en MN
- Rc,cr,d (ELS quasi-permanent) : la charge de fluage en compression à l'ELS Q-P, en MN
- Rt,d (ELU durables et transitoires) : la résistance en traction de la fondation à l'ELU, en MN
- Rt,d (ELU accidentel) : la résistance en traction de la fondation à l'ELA, exprimée en MN
- Rt,d (ELU sismique) : la résistance en traction de la fondation à l'ELA sismique, en MN
- Rt,cr,d (ELS caractéristiques) : la charge de fluage en traction à l'ELS C, exprimée en MN
- Rt,cr,d (ELS quasi-permanent) : la charge de fluage en traction à l'ELS Q-P, exprimée en MN
- verification :
 - OK : si la condition est vérifiée
 - PAS OK : si la condition n'est pas vérifiée

Quant à la troisième partie, on vérifie le béton à la compression à l'ELS. Cette partie se présente sous la forme suivante :

```

k1 = XXXXX
k2 = XXXXX
k3 = XXXXX
Cmax = XXXXX MPa
fck* = XXXXX MPa

Vérification en combinaison caractéristique :
sigmacmoydcaractéristique = XXXXX MPa
Sigma,moy,ELS = XXXXX MPa < XXXXX MPa => verification
sigmacmaxdcaractéristique = XXXXX MPa
Sigma,max,ELS = XXXXX MPa < XXXXX MPa => verification

Vérification en combinaison quasi-permanant :
sigmacmoydquasipermanent = XXXXX MPa
Sigma,moy,ELS = XXXXX MPa >= XXXXX MPa => verification
sigmacmaxdquasipermanent = XXXXX MPa
Sigma,max,ELS = XXXXX MPa >= XXXXX MPa => verification
  
```

FIGURE 5.7 : Forme du fichier de résultats représentant les vérifications

Avec :

- $k1$: coefficient dépendant du type de pieu
- $k2$: coefficient k2

- k_3 : coefficient de prime aux contrôles d'intégrité
- C_{max} : la valeur forfaitaire de la résistance à la compression du béton, exprimé en MPa
- f_{ck}^* : la résistance caractéristique à la compression, exprimée en MPa
- $\Sigma_{cmoyd,caractéristique}$: la valeur de calcul de la contrainte moyenne de compression en combinaison caractéristique, exprimée en MPa
- $\Sigma_{moy,ELS}$: la valeur limite de la contrainte moyenne de compression en combinaison caractéristique, exprimée en MPa
- $\Sigma_{cmaxd,caractéristique}$: la valeur de calcul de la contrainte maximale de compression en combinaison caractéristique, exprimée en MPa
- $\Sigma_{moy,ELS}$: la valeur limite de la contrainte maximale de compression en combinaison caractéristique, exprimée en MPa
- $\Sigma_{cmoyd,quasipermanent}$: la valeur de calcul de la contrainte moyenne de compression en combinaison quasi-permanente, exprimée en MPa
- $\Sigma_{moy,ELS}$: la valeur limite de la contrainte moyenne de compression en combinaison quasi-permanente, exprimée en MPa
- $\Sigma_{cmaxd,quasipermanent}$: la valeur de calcul de la contrainte maximale de compression en combinaison quasi-permanente, exprimée en MPa
- $\Sigma_{moy,ELS}$: la valeur limite de la contrainte maximale de compression en combinaison quasi-permanente, exprimée en MPa
- verification :
 - OK : si la condition est vérifiée
 - PAS OK : si la condition n'est pas vérifiée

Le fichier « *Alpha,pieu-sol.png* » est un fichier au format image. Il s'agit d'un graphe qui présente le paramètre adimensionnel $\alpha_{pieu-sol}$.

Le fichier « *F,sol.png* » est un fichier au format image. Il s'agit d'un graphe qui présente le paramètre adimensionnel f_{sol} .

Le fichier « *kp.png* » est un fichier au format image. Il s'agit d'un graphe qui présente le facteur de portance pressiométrique k_p .

Le fichier « *qs.png* » est un fichier au format image. Il s’agit d’un graphe qui présente le frottement axial unitaire limite q_s .

Le fichier « *Rs.png* » est un fichier au format image. Il s’agit d’un graphe qui présente le Résistance de frottement axial R_s .

Le fichier « *Rb.png* » est un fichier au format image. Il s’agit d’un graphe qui présente la résistance de pointe R_b .

Le fichier « *Sondage.png* » est un fichier au format image. Il s’agit d’un graphe qui présente les pressions limites nettes et les modules pressiométriques de chaque couche du sol, en MPa, en fonction de la profondeur du sol, en mètre, en échelle logarithmique.

5.5 Méthode de calcul

La méthode de calcul de la capacité portante des pieux est basée sur les principes de justification selon l’Eurocode 7 [16] et la norme NF P94-262 [6] : $F_{c,d} \leq R_{c,d}$

Avec :

- $F_{c,d}$: la résultante des charges appliquée sur le pieu
- $R_{c,d}$: la valeur de la portance d’un pieu

Pour cette version de **EKFond**, on exécute que les essais pressiométriques.

L’utilisateur choisit une des deux procédures de calcul suivantes :

- Modèle de pieu
- Modèle de terrain

5.5.1 Calcul de la capacité portante

Le calcul est réalisé à partir des :

- Résultats des essais pénétrométriques réalisés sur le sol du terrain, lus à partir du fichier « *Sondages.txt* »
- Caractéristiques des pieux à réaliser, lues à partir du fichier « *Fondation.txt* ».

5.5.1.1 Calcul de la résistance de pointe

Le calcul de la résistance de pointe est effectué suivant le diagramme suivant :

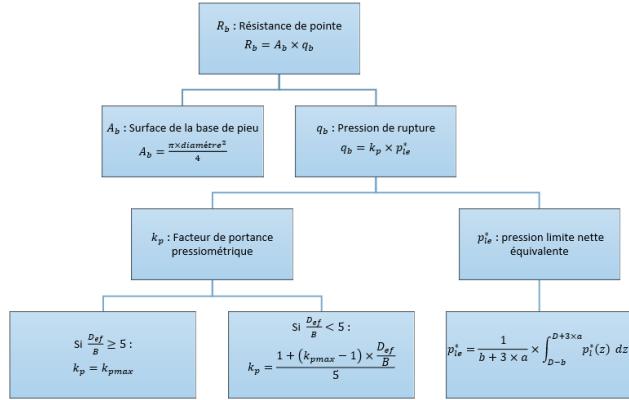


FIGURE 5.8 : Diagramme de calcul de la résistance de pointe

Avec :

- p_l^* : pression limite nette
- D : longueur du pieu
- D_{ef} : hauteur d'encastrement effective : $D_{ef} = \frac{1}{p_{le}^*} \int_{D-10B}^D p_l^*(z) dz$
- B : diamètre du pieu
- $a = \max(\frac{B}{2}, 0.5)$
- $b = \min(a, h)$
- h : hauteur du pieu contenue dans la formation porteuse
- k_{pmax} : Facteur de portance pressiométrique maximum, définie dans le tableau F.4.2.1 [6]

5.5.1.2 Calcul de la résistance de frottement axial

Le calcul de la résistance de frottement axial est effectué suivant le diagramme suivant :

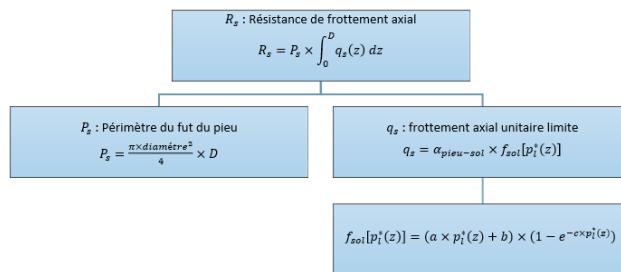


FIGURE 5.9 : Diagramme de calcul de la résistance de frottement axial

Avec :

- $\alpha_{pieu-sol}$: paramètre adimensionnel qui dépend du type de pieu et du type de sol, ce paramètre est défini dans le tableau F.5.2.1 de la norme [6]

- Les paramètres a, b et c sont définis dans le tableau F.5.2.2 de la norme [6]
- q_s : est limité par les valeurs maximales q_{smax} définies dans le tableau F.5.2.3 de la norme [6]

5.5.2 Procédure « modèle de terrain »

5.5.2.1 Calcul de la résistance axial caractéristique

La valeur caractéristique de la résistance axial est calculée à l'aide de la formule suivante [6] :

$$R_{s,k} = \frac{R_s}{\gamma_{R;d_1} * \gamma_{R;d_2}}$$

Avec :

- R_s : résistance de frottement axial
- $\gamma_{R;d_1}$: coefficient partiel de modèle lié à la dispersion du modèle de calcul
- $\gamma_{R;d_2}$: coefficient partiel lié au calage des méthodes de calcul

Les valeurs des coefficients $\gamma_{R;d_1}$ et $\gamma_{R;d_2}$ sont définies dans le tableau F.2.1 de la norme [6].

5.5.2.2 Calcul de la résistance de pointe caractéristique

La valeur caractéristique de la résistance de pointe est calculée selon la formule suivante [6] :

$$R_{b,k} = \frac{R_b}{\gamma_{R;d_1} * \gamma_{R;d_2}}$$

Avec :

- R_b : résistance de frottement de pointe

5.5.2.3 Calcul de portance en compression de la fondation profonde à l'état-limite ultime

La valeur de la portance en compression d'une fondation à l'état-limite ultime est calculée selon la formule suivante [6] :

$$R_{c;d} = \frac{R_{b;k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s;k}}{\gamma_s}$$

Avec :

- γ_b : facteur partiel pour la résistance de pointe (voir tableau suivant)
- γ_s : facteur partiel pour la résistance de frottement axial (voir tableau suivant)

TABLEAU 5.1 : Valeurs des facteurs γ_b et γ_s [6]

Situations durables et transitoires – Situations sismiques	
γ_b	1.1
γ_s	1.1
Situations accidentielles	
γ_b	1.0
γ_s	1.0

5.5.2.4 Calcul de la résistance en traction de la fondation profonde à l'état-limite ultime

La valeur de la résistance en traction d'une fondation à l'état-limite ultime est calculée selon la formule suivante [6] :

$$R_{t;d} = \frac{R_{t;k}}{\gamma_{s;t}}$$

Avec :

- $R_{t;k}$: valeur caractéristique de la résistance en traction du pieu
- $\gamma_{s;t}$: facteur partiel pour la résistance en traction

Les valeurs de $\gamma_{s;t}$ sont définies dans le tableau suivant :

TABLEAU 5.2 : Valeurs des facteurs $\gamma_{s;b}$ [6]

Situations durables et transitoires – Situations sismiques	
$\gamma_{s;b}$	1.15
Situations accidentielles	
$\gamma_{s;b}$	1.05

5.5.2.5 Calcul de la charge de fluage en compression à l'état-limite de service

La valeur de la charge de fluage en compression à l'état-limite de service est calculée selon la formule suivante [6] :

$$R_{c;cr;d} = \frac{R_{c;cr;k}}{\gamma_{cr}}$$

- $R_{c;cr;k}$: valeur caractéristique de la charge de fluage en compression :

- Sans refoulement de sol : $R_{c;cr;k} = 0.5R_{b;k} + 0.7R_{s;k}$

- Avec refoulement de sol : $R_{c;cr;k} = 0.7R_{b;k} + 0.7R_{s;k}$
- γ_{cr} : facteur partiel sur la charge de fluage de compression, définie dans le tableau suivant :

TABLEAU 5.3 : Valeurs des facteurs γ_{cr} [6]

ELS - Combinaisons caractéristiques	
γ_{cr}	0.9
ELS - combinaisons quasi-permanentes	
γ_{cr}	1.1

5.5.2.6 Calcul de la charge de fluage en traction à l'état-limite de service

La valeur de la charge de fluage en traction à l'état-limite de service est calculée selon la formule suivante [6] :

$$R_{t;cr;d} = \frac{R_{t;cr;k}}{\gamma_{s;cr}}$$

- $R_{t;cr;k}$: valeur caractéristique de la charge de fluage en traction : $R_{t;cr;k} = 0.7R_{s;k}$
- $\gamma_{s;cr}$: facteur partiel sur la charge de fluage de traction, définie dans le tableau suivant :

TABLEAU 5.4 : Valeurs du facteur $\gamma_{s;cr}$ [6]

ELS - Combinaisons caractéristiques	
$\gamma_{s;cr}$	1.1
ELS - combinaisons quasi-permanentes	
$\gamma_{s;cr}$	1.5

5.5.3 Procédure « modèle de pieu »

5.5.3.1 Calcul de valeur caractéristique de la portance

La valeur caractéristique de la portance est calculée selon la formule suivante [6] :

$$R_{c;k} = \frac{1}{\gamma_{R;d1}} \min \left(\frac{R_{c; \text{moyen}}}{\zeta_3}, \frac{R_{c;\min}}{\zeta_4} \right)$$

Avec :

- $R_{c; \text{moyen}}$: valeur moyenne de la portance de chaque essai : $R_{c; \text{moyen}} = R_{b; \text{moyen}} + R_{s; \text{moyen}}$
- $R_{c; \min}$: valeur minimale de la portance de chaque essai : $R_{c; \min} = R_{b; \min} + R_{s; \min}$

- $\gamma_{R;d1}$: coefficient partiel de modèle lié à la dispersion du modèle de calcul, défini dans le tableau suivant :

TABLEAU 5.5 : Valeurs du facteur $\gamma_{R;d1}$

	$\gamma_{R;d1}$ compression	$\gamma_{R;d1}$ traction
Pieux non ancrés dans la craie de la classe 1 à 7 (hors pieux catégorie 10 et 15)	1.15	1.4
Pieux ancrés dans la craie de la classe 1 à 7 (hors pieux catégorie 10, 15, 17, 18, 19 et 20)	1.4	1.7
Pieux catégorie 10, 15, 17, 18, 19 et 20	2.0	2.0

- ζ_3 et ζ_4 : facteurs de corrélation qui dépendent de la surface d'investigation et du nombre d'essais : $\xi_i(N, S) = 1 + [\xi'_i(N) - 1] \sqrt{\frac{S}{S_{ref}}}$
- S_{ref} : surface de référence, égale à 2500 m^2
- S : surface d'investigations géotechniques
- ζ'_3 et ζ'_4 : coefficients partiels dépendant du nombre d'essais, définis dans le tableau suivant :

TABLEAU 5.6 : Valeurs du facteur ζ'_3 et ζ'_4 [6]

Nombre d'essais	1	2	3	4	5 à 6	7 à 9	$>=10$
ζ'_3	1.40	1.35	1.33	1.31	1.29	1.27	1.25
ζ'_4	1.40	1.27	1.23	1.20	1.15	1.12	1.08

5.5.3.2 Calcul de valeur caractéristique de la résistance en traction

La valeur caractéristique de la résistance en traction d'une fondation est calculée selon la formule suivante [6] :

$$R_{t;k} = \frac{1}{\gamma_{R;d1}} \min \left(\frac{R_{s;\text{moyen}}}{\zeta_3}, \frac{R_{s;\text{min}}}{\zeta_4} \right)$$

5.5.3.3 Calcul de la résistance de frottement axial

La valeur caractéristique de la résistance de frottement axial d'une fondation est calculée selon la formule suivante [6] :

$$R_{s;k} = \frac{R_{s;\text{moyen}}}{R_{s;\text{moyen}}} R_{c;k}$$

5.5.3.4 Calcul de portance en compression de la fondation profonde à l'état-limite ultime

La valeur de la portance en compression d'une fondation à l'état-limite ultime est calculée selon la formule suivante [6] :

$$R_{c;d} = \frac{R_{c;k}}{\gamma_t}$$

Avec :

- γ_t : facteur partiel pour la résistance en compression, défini dans le tableau suivant :

TABLEAU 5.7 : Valeurs du facteur γ_t [6]

Situations durables et transitoires – Situations sismiques	
γ_t	1.1
Situations accidentnelles	
γ_t	1.0

5.5.3.5 Calcul de portance en traction de la fondation profonde à l'état-limite ultime

La valeur de la portance en traction d'une fondation à l'état-limite ultime est calculée selon la formule suivante [6] :

$$R_{t;d} = \frac{R_{t;k}}{\gamma_{s;t}}$$

Avec :

- $\gamma_{s;t}$: facteur partiel pour la résistance en traction, défini dans le tableau suivant :

TABLEAU 5.8 : Valeurs du facteur $\gamma_{s;t}$ [6]

Situations durables et transitoires – Situations sismiques	
$\gamma_{s;t}$	1.15
Situations accidentnelles	
$\gamma_{s;t}$	1.05

5.5.3.6 Calcul de la charge de fluage en compression à l'état-limite de service

La valeur de la charge de fluage en compression à l'état-limite de service est calculée selon la formule suivante [6] :

$$R_{c;cr;d} = \frac{R_{c;cr;k}}{\gamma_{cr}}$$

— $R_{c;cr;k}$: valeur caractéristique de la charge de fluage en compression :

- Sans refoulement de sol : $R_{c;cr;k} = 0.5R_{b;k} + 0.7R_{s;k}$
- Avec refoulement de sol : $R_{c;cr;k} = 0.7R_{b;k} + 0.7R_{s;k}$

— γ_{cr} : facteur partiel sur la charge de fluage de compression, définie dans le tableau suivant :

TABLEAU 5.9 : Valeurs du facteur γ_{cr} [6]

ELS - Combinaisons caractéristiques	
γ_{cr}	0.9
ELS - combinaisons quasi-permanentes	
γ_{cr}	1.1

5.5.3.7 Calcul de la charge de fluage en traction à l'état-limite de service

La valeur de la charge de fluage en traction à l'état-limite de service est calculée selon la formule suivante [6] :

$$R_{t;cr;d} = \frac{R_{t;cr;k}}{\gamma_{s;cr}}$$

— $R_{t;cr;k}$: valeur caractéristique de la charge de fluage en traction : $R_{t;cr;k} = 0.7R_{s;k}$

— $\gamma_{s;cr}$: facteur partiel sur la charge de fluage de traction, définie dans le tableau suivant :

TABLEAU 5.10 : Valeurs du facteur $\gamma_{s;cr}$ [6]

ELS - Combinaisons caractéristiques	
$\gamma_{s;cr}$	1.1
ELS - combinaisons quasi-permanentes	
$\gamma_{s;cr}$	1.5

5.5.4 Vérification du béton

On vérifie la compression le béton à l'ELS, donc vis-à-vis les sollicitations caractéristiques et quasi-permanentes.

5.5.4.1 Première vérification

La première vérification à effectuer est la comparaison entre la contrainte moyenne et sa valeur limite, comme il est montré dans le diagramme suivant :

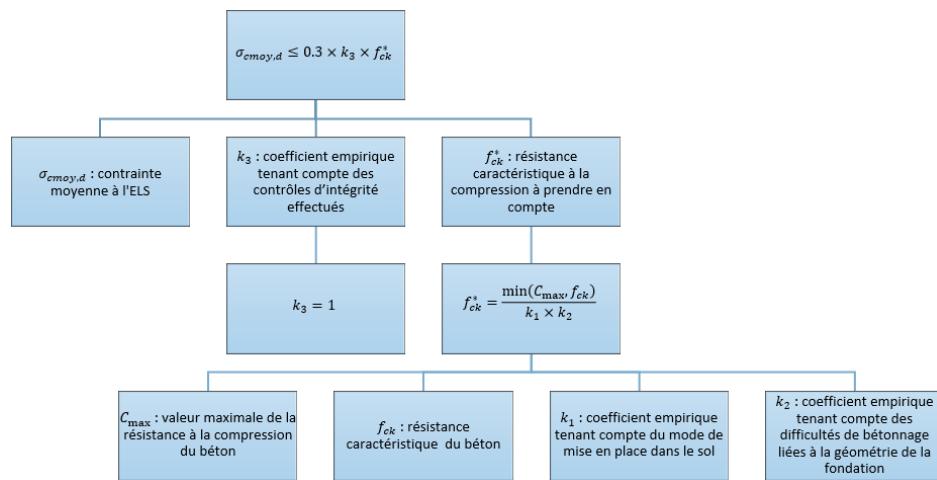


FIGURE 5.10 : Diagramme de la vérification de la contrainte moyenne

Avec :

- $k_2 = 1.05$ pour les pieux forés et les barrettes dont le rapport de la plus petite dimension B à la longueur est inférieur à $\frac{1}{20}$
- $k_2 = 1.3 - \frac{B}{2}$ pour les pieux forés et les barrettes dont la plus petite dimension B est inférieure à 0,6 m
- $k_2 = 1.35 - \frac{B}{2}$ pour les pieux forés et les barrettes réunissant les deux premières conditions
- $k_2 = 1$ sinon

Les valeurs de C_{max} et du coefficient k_1 sont définies dans le tableau 6.4.1.1 de la norme [6] :

5.5.4.2 Deuxième vérification

La première vérification à effectuer est la comparaison entre la contrainte maximale et sa valeur limite, comme il est montré dans le diagramme suivant :

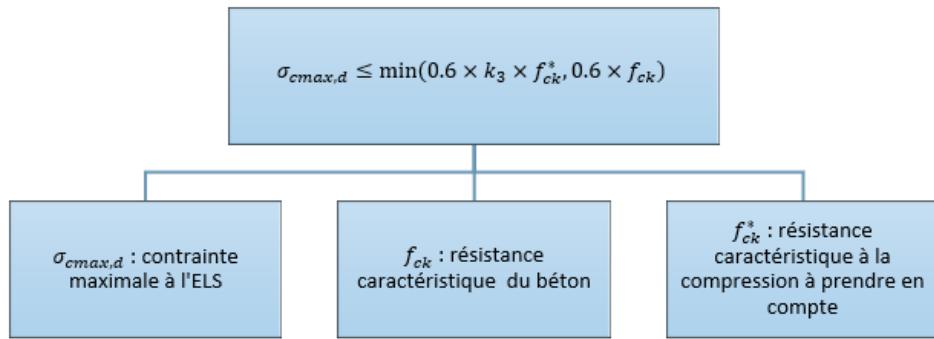


FIGURE 5.11 : Diagramme de la vérification de la contrainte maximale

5.6 Tests de validation

5.6.1 Déroulement des tests de validation

La validation des tests est effectuée en comparant les résultats obtenus par **EKFond** par celles obtenus par un logiciel de référence.

Le logiciel de référence qu'on a choisi pour valider notre outil est « **Geofond** ». Il s'agit d'un outil de calcul fiable, optimisé et conforme aux Eurocodes développé par « **Geos** », une filiale de « **Ingérop** ». [17]

Un test est validé si l'écart entre les résultats obtenus par **EKFond** et celles obtenues par le logiciel de référence « **Geofond** » est très faible.

Pour cette version de **EKFond**, on ne valide que les résultats obtenus par la procédure de modèle de terrain.

5.6.2 Grille de test de validation

Pour les tests de validation, on choisit le même sondage, les mêmes caractéristiques du pieu et les mêmes charges appliqués à la fondation, en variant la catégorie du pieu d'une part et la hauteur où on néglige les frottements d'autre part.

Quant au sondage, on adopte celui défini dans le tableau suivant :

TABLEAU 5.11 : Sondage adopté pour les tests de validation

Profondeur (m)	$P_l^*(MPa)$	$E_M (MPa)$	Nature sol
1	0.24	7.6	Argile, limons
2	0.2	3.9	Argile, limons
3	0.12	2.9	Argile, limons
4	0.12	1.7	Argile, limons
5	0.15	1.9	Argile, limons
6	0.24	2.2	Argile, limons
7	0.3	2.93	Argile, limons
8	3.32	64.72	Argile, limons
9	4.8	168	Sable grave
10	4.8	128	Sable grave
11	4.78	115.3	Sable grave
12	4.76	130	Sable grave
13	4.77	112.67	Sable grave
14	4.82	83.4	Sable grave
15	5.08	42.2	Sable grave

Pour le pieu, on choisit les paramètres suivants :

- Classe de pieu : 1,2
- Catégorie du pieu : Foré simple (pieux et barrettes), Foré boue (pieux et barrettes) et Foré tarière continue simple rotation ou double rotation
- Sans refoulement
- Cote pieu : 0m
- Hauteur de frottement négligeable : variables :
 - Cas 1 : 0m
 - Cas 2 : 1m
 - Cas 3 : 2m
 - Cas 4 : 7m
 - Cas 5 : 8m

- Cas 6 : 9m
 - Module de Young : 200000MPa
 - Diamètre du pieu : 0.4m
 - Résistance caractéristique du béton : 30MPa

On choisit d'appliquer sur le pieu les charges suivantes :

- En compression :
 - ELU fondamental : 0.528 MN
 - ELU accidentel : 0.673 MN
 - ELU sismique : 0.673 MN
 - ELS caractéristique : 0.436 MN
 - ELS quasi-permanent : 0.347 MN
- En traction :
 - ELU fondamental : 0 MN
 - ELU accidentel : 0 MN
 - ELU sismique : 0 MN
 - ELS caractéristique : 0 MN
 - ELS quasi-permanent : 0 MN

5.6.3 Validaion des tests

La comparaison des résultats est détaillée dans l'annexe.

Les résultats montrent que les calculs fournis par **EKfond** sont cohérents avec ceux calculés par le logiciel de référence. Ce qui nous permet de valider l'outil pour le cas de la procédure de modèle de terrain.

5.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons démontré que l'outil **EKfond** développé dans **EKIUM** est validé et prêt à l'emploi.

Chapitre 6

EKFIELD

Plan

1	Introduction	73
2	Description de l'outil	73
3	Objet de l'outil	73
4	Fonctionnement de l'outil	74
5	Méthode de calcul	85
6	Tests de validation	93
7	Exemple de calcul	93
8	Conclusion	94

6.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous introduisons l'outil de calcul **EKfielle**, son but et la façon dont il fonctionne.

Nous décrivons également les méthodes de calcul que nous avons utilisées pour élaborer cet outil de calcul.

6.2 Description de l'outil

EKfielle est un outil de calcul et de dimensionnement des fondations superficielles, en particulier les semelles, développé par **EKIUM** sous le langage « *Python 3* ».

6.3 Objet de l'outil

L'objet de l'outil **EKfielle** est de vérifier la stabilité de la semelle et sa portance ainsi que calculer le tassement et son ferraillage.

Les calculs sont réalisés conformément aux règles suivantes :

- EC7 [16]
- NF P94-261 [5]
- EC8 [7]
- EC2 [3]
- DTU 13.12 [18]

Les vérifications de la portance sont réalisées à l'ELA.

Les calculs de tassement sont réalisés à l'ELS quasi-permanent.

L'outil **EKfielle** requiert en entrée :

- Un fichier « *Données.txt* » indiquant la méthode de calcul et les données géométrique de la semelle ainsi que des données du terrain.
- Un fichier « *Sondages.txt* » contenant les paramètres et les résultats des sondages effectués.
- Un fichier « *Charges.txt* » contenant les détails des sollicitations agissant sur la semelle.
- Un fichier « *Tassement.txt* » contenant les paramètres nécessaires pour calculer le tassement.
- Un fichier « *Séisme.txt* » contenant les données et les paramètres nécessaires pour le calcul de la portance.

- Un fichier « *Ferraillage.txt* » contenant la méthode et les caractéristiques de l'acier à utiliser.

L'outil **EKfielle** fournit en sortie :

- Un fichier résultats au format « *.txt* ».

6.4 Fonctionnement de l'outil

Pour exécuter l'outil **EKfielle**, il suffit de lancer le fichier « *EKfielle.exe* ».

Tout d'abord, il faut s'assurer que tous les fichiers contenant les données et les paramètres de calcul existent dans le même répertoire que *EKfielle* et qu'ils soient sous la bonne forme.

6.4.1 Fichiers de données

Le fichier de données « *Données.txt* » fournit les informations à propos la méthode de calcul à utiliser et fournit les données géométriques de la semelle ainsi que les caractéristiques du sol.

Ce fichier comporte 6 lignes. Selon ma méthode de calcul, le fichier des données suit différentes formes. Si la méthode de calcul choisie est la méthode analytique, le fichier des données doit suivre la forme suivante :

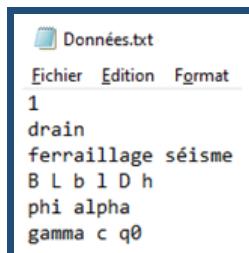


FIGURE 6.1 : Forme du fichier de données « *Données* » pour le cas de la méthode analytique

□ *Ligne 2*

- *drain* :

- 1 : drainé
- 2 : non drainé

□ *Ligne 3*

- *ferraillage* : l'utilisateur choisit s'il veut calculer le ferraillage

- OUI
- NON

— séisme : l'utilisateur choisit s'il veut faire le calcul sismique

- OUI
- NON

□ **Ligne 4**

— B,L,b,l,D,h : dimension de la semelle

□ **Ligne 5**

— phi : l'angle de frottement interne, exprimé en degré

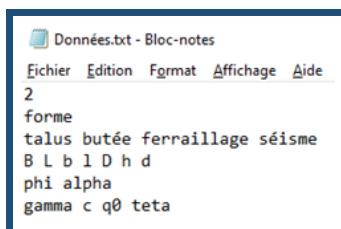
— alpha : l'inclinaison de la semelle, exprimé en degré

□ **Ligne 6**

— gamma : le poids volumique, exprimé en kN/m³

— c : la cohésion, exprimée en MPa

Si la méthode de calcul est la méthode pressiométrique, le fichier des données doit suivre la forme suivante :



```
Données.txt - Bloc-notes
Fichier Édition Format Affichage Aide
2
forme
talus butée ferraillage séisme
B L b l D h d
phi alpha
gamma c qθ teta
```

FIGURE 6.2 : Forme du fichier de données « *Données* » pour le cas de la méthode pressiométrique

□ **Ligne 2**

— drain :

- R : rectangulaire
- F : filante
- C : circulaire

□ **Ligne 3**

— talus : l'utilisateur renseigne s'il y a un talus

- OUI
- NON

- butée : l'utilisateur renseigne s'il y a de la butée
 - OUI
 - NON
- ferraillage : l'utilisateur choisit s'il veut calculer le ferraillage
 - OUI
 - NON
- séisme : l'utilisateur choisit s'il veut faire le calcul sismique
 - OUI
 - NON

□ *Ligne 4*

- B, L (si forme $\neq C)$, b, l (si forme $\neq C)$, D, h : dimension de la semelle

□ *Ligne 5*

- ϕ : l'angle de frottement interne, exprimé en degré
- α : l'inclinaison de la semelle, exprimé en degré

□ *Ligne 6*

- γ : le poids volumique, exprimé en kN/m³
- c : la cohésion, exprimée en MPa
- q_0 : la contrainte à la base, exprimée en MPa
- θ : l'angle du talus, exprimé en degré (si talus = OUI)

Le fichier de données « *Sondages.txt* » fournit les caractéristiques du sol à partir des résultats des essais effectués sur le terrain. Ce fichier doit comporter [1+ (nombre de couches)] lignes. Le fichier des sondages doit suivre la forme suivante :



FIGURE 6.3 : Forme du fichier de données « *Sondage* »

□ *Ligne 1*

- $nombre_couche$: nombre de couche de chaque sondage

□ Ligne 2 jusqu'à ligne [nombre_couche+1]

- profondeur_couche : la profondeur de chaque couche par rapport au terrain naturelle, exprimé en mètre
- pression_limite_nette_couche : la pression limite nette de chaque couche, exprimé en MPa
- module_pressiométrique : le module pressiométrique de chaque couche, exprimé en MPa
- séisme : l'utilisateur choisit s'il veut faire le calcul sismique
 - 1 : Argile et Limons
 - 2 : Sols intermédiaires
 - 3 : Sable Grave
 - 4 : Craie
 - 5 : Marne et Calcaire-Marneux
 - 6 : Roche altérée où fragmentée

Le fichier de données « *Charges.txt* » fournit les détails des sollicitations agissant sur la semelle.

Ce fichier doit comporter $[1 + (\text{nombre de cas de charges})]$ lignes.

Le fichier des charges doit suivre la forme suivante :

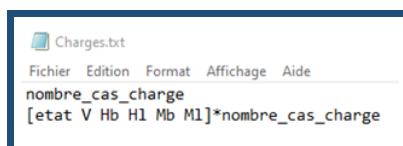


FIGURE 6.4 : Forme du fichier de données « *Charges* »

□ Ligne 1

- nombre_cas_charge : nombre de cas de charge

□ Ligne 2 jusqu'à ligne [nombre_cas_charge+1]

- etat : l'état limite de chaque cas de charge :

- ELU : état limite ultime
- ELA : état limite accidentelle
- ELSC : état limite de service caractéristique

- ELSF : état limite de service fréquente
- RLSQP : état limite de service quasi-permanente
- V : la somme des forces verticales appliquées à la semelle, exprimé en MN
- H_b : la somme des forces horizontales appliquées à la semelle sur la coté B, exprimé en MN
- H_l : la somme des forces horizontales appliquées à la semelle sur la coté L, exprimé en MN
- M_b : la somme des moments appliquées à la semelle sur la coté B, exprimé en MNm
- M_l : la somme des moments appliquées à la semelle sur la coté L, exprimé en MNm

Le fichier de données « *Tassement.txt* » fournit les paramètres nécessaires pour le calcul du tassemement.

Ce fichier doit comporter 3 lignes.

Le fichier de tassemement doit suivre la forme suivante :

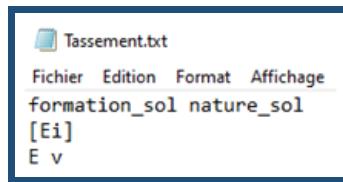


FIGURE 6.5 : Forme du fichier de données « *Tassement* »

□ *Ligne 1*

- $\underline{formation_sol}$: la formation de la couche du sol
 - 1 : Tourbe
 - 2 : Argile
 - 3 : Limon
 - 4 : Sable
 - 5 : Sable et gravier
 - 6 : Roche
- $\underline{nature_sol}$: la nature de la couche de sol
 - Si $formation_sol \neq 6$:
 - 1 : Surconsolidé ou très serré

- 2 : Normalement consolidé
- 3 : Sous consolidé altéré et remanié ou lâche
- Si formation_sol = 6 :
 - 1 : Très peu Facturé
 - 2 : Normal
 - 3 : Très facturé
 - 4 : Très altéré

□ **Ligne 2**

— E_i : liste des modules pressiométriques équivalents

□ **Ligne 3**

— E : module de young

— v : coef de poisson

Le fichier « *Séisme.txt* » fournit les données et les paramètres nécessaires pour le calcul de la portance. Ce fichier doit comporter 3 ou 4 lignes selon la nature du sol. Si le sol est purement cohérent, le fichier de fondation doit suivre la forme suivante :

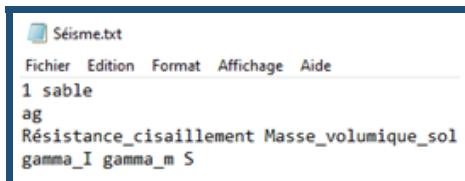


FIGURE 6.6 : Forme du fichier de données « *Séisme* » pour le cas du sol purement cohérent

□ **Ligne 1**

— $sable$: la nature du sable

- 1 : Sable moyennement dense à dense
- 2 : Sable lâche sec
- 3 : Sable lâche saturé
- 4 : Argile non sensible
- 5 : Argile sensible

□ **Ligne 2**

— a_g : accélération du sol

□ **Ligne 3**

- Résistance_cisaillement : la résistance au cisaillement
- Masse_volumique_sol : le coefficient de Poisson

□ **Ligne 4**

- gamma_I : la résistance au cisaillement
- gamma_m : le coefficient partiel de matériau
- S : le paramètre caractéristique de la classe de sol

Si le sol est purement pulvérulent, le fichier de fondation doit suivre la forme suivante :



```

Séisme.txt
Fichier Edition Format Affichage Aide
2 sable
ag
gamma_I gamma_m S N_gamma phi_prim_d

```

FIGURE 6.7 : Forme du fichier de données « *Séisme* » pour le cas du sol purement cohérent

□ **Ligne 1**

- sable : la nature du sable
 - 1 : Sable moyennement dense à dense
 - 2 : Sable lâche sec
 - 3 : Sable lâche saturé
 - 4 : Argile non sensible
 - 5 : Argile sensible

□ **Ligne 2**

- a_g : accélération du sol

□ **Ligne 3**

- gamma_I : la résistance au cisaillement
- gamma_m : le coefficient partiel de matériau
- S : le paramètre caractéristique de la classe de sol
- N_gamma : le coefficient de capacité portante

- phi_prim_d : l'angle de frottement du sol

Le fichier « *Ferraillage.txt* » fournit la méthode et les caractéristiques de l'acier à utiliser.

Ce fichier doit comporter 2 lignes.

Le fichier du ferraillage doit suivre la forme suivante :



FIGURE 6.8 : Forme du fichier de données « *Ferraillage* »

□ *Ligne 1*

- norme : la norme de calcul :

- DTU : pour DTU 13.12
- EC2 : pour EC2

□ *Ligne 2*

- fck : la résistance caractéristique
- fyk : la limite d'élasticité
- enrobage : l'enrobage, exprimé en mètre

6.4.2 Fichiers des résultats

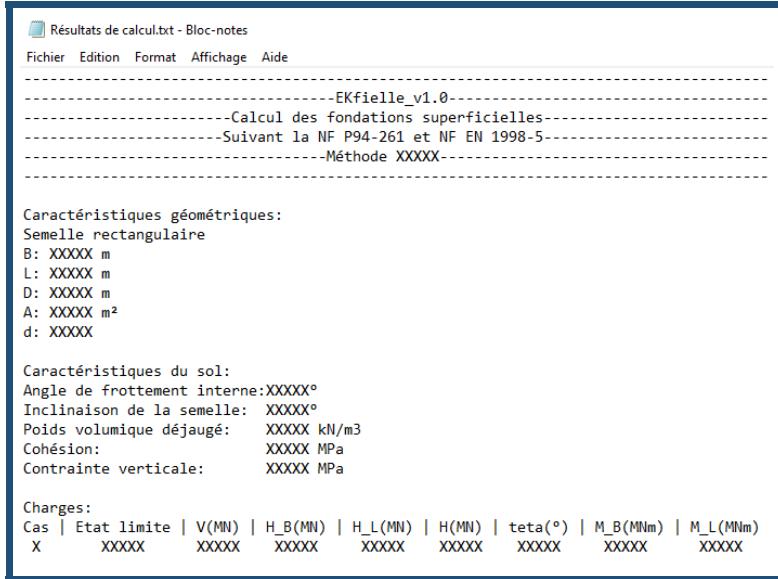
Après l'exécution de l'outil, **EKfielle** lit les fichiers d'entrée nécessaires selon le besoin et commence son processus.

Ce processus se termine par la création d'un répertoire « *Résultats* » qui contient un fichier des résultats de type « *.txt* » appelé « *Résultats de calcul.txt* ».

Le fichier des résultats comporte plusieurs parties.

La première partie présente certaines données d'entrée telles que les charges de chaque cas, les caractéristiques géométriques de la semelle et les caractéristiques du sol.

Cette partie suit la forme suivante :



```

Résultats de calcul.txt - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage Aide
-----
-----EKfielle_v1.0-----
-----Calcul des fondations superficielles-----
-----Suivant la NF P94-261 et NF EN 1998-5-----
-----Méthode XXXXX-----
-----

Caractéristiques géométriques:
Semelle rectangulaire
B: XXXXX m
L: XXXXX m
D: XXXXX m
A: XXXXX m2
d: XXXXX

Caractéristiques du sol:
Angle de frottement interne:XXXXX°
Inclinaison de la semelle: XXXXX°
Poids volumique déjaugé: XXXXX kN/m3
Cohésion: XXXXX MPa
Contrainte verticale: XXXXX MPa

Charges:
Cas | Etat limite | V(MN) | H_B(MN) | H_L(MN) | H(MN) | teta(°) | M_B(MNm) | M_L(MNm)
X   XXXXX      XXXXX    XXXXX    XXXXX    XXXXX    XXXXX    XXXXX    XXXXX

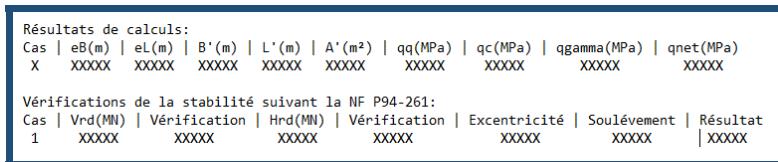
```

FIGURE 6.9 : Forme du fichier de résultats représentant les données d'entrée

Avec XXXXX sont les valeurs.

La deuxième partie présente les résultats de calculs. On distingue deux méthodes de calcul, méthode analytique et méthode pressiométrique, donc on a deux cas d'affichage selon la méthode.

Pour la méthode analytique, cette partie suit la forme suivante :



```

Résultats de calculs:
Cas | eB(m) | el(m) | B'(m) | L'(m) | A'(m2) | qq(MPa) | qc(MPa) | qgamma(MPa) | qnet(MPa)
X   XXXXX  XXXXX  XXXXX  XXXXX  XXXXX  XXXXX  XXXXX  XXXXX  XXXXX

Vérifications de la stabilité suivant la NF P94-261:
Cas | Vrd(MN) | Vérification | Hrd(MN) | Vérification | Excentricité | Soulèvement | Résultat
1   XXXXX      XXXXX      XXXXX      XXXXX      XXXXX      XXXXX      | XXXXX

```

FIGURE 6.10 : Forme du fichier de résultats représentant les résultats de calculs pour la méthode analytique

Avec :

- e_B : excentricité par rapport à l'axe longitudinal d'une fondation
- e_L : excentricité par rapport à l'axe transversal d'une fondation
- B' : largeur ou diamètre effectif de la fondation
- L' : longueur effective de la fondation
- A' : surface effective de la base de la fondation
- qq : contrainte de surcharge

- qc : contrainte de cohésion
- $qgamma$: contrainte de surface
- $qnet$: contrainte nette du résistance du terrain sous une semelle
- V_{rd} : effort verticale résistant
- H_{rd} : effort horizontal résistant
- Excentricité, Soulévement, Verification :
 - OUI : Si la condition est vérifiée
 - NON : Si la condition n'est pas vérifiée
 - NA : Si on ne tient pas compte
- Résultat :
 - OUI : Si la semelle vérifie toutes les conditions
 - NON : Si la semelle ne vérifie pas les conditions

Pour la méthode préssiométrique, cette partie suit la forme suivante :

Résultats de calculs:												
Cas	$eB(m)$	$eL(m)$	$B'(m)$	$L'(m)$	$A'(m^2)$	$hr(m)$	$De(m)$	kp	$Ple(MPa)$	i_delta	i_beta	$qnet(MPa)$
X	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX

Vérifications de la stabilité suivant la NF P94-261:						
Cas	$Vrd(MN)$	Vérification	$Hrd(MN)$	Vérification	Excentricité	Soulévement
X	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX

FIGURE 6.11 : Forme du fichier de résultats représentant les résultats de calculs pour la méthode préssiométrique

Avec :

- hr : épaisseur du terrain
- De : hauteur d'encastrement équivalente
- kp : facteur de portance préssiométrique
- Ple : pression limite nette équivalente
- i_delta : coefficient de réduction lié à l'inclinaison du chargement
- i_beta : coefficient de réduction lié à la présence d'un talus

Une troisième partie qui représente le calcul du tassement en cas des combinaisons ELS quasi-permanent. Cette partie prend la forme suivante :

Calcul du tassement suivant la méthode pressiométrique de la NF P94-261:			
Cas	Sc(mm)	Sd(mm)	Sf(mm)
X	XXXXX	XXXXX	XXXXX
Calcul du tassement suivant le modèle élastique:			
Cas	Sf(mm)		
X	XXXXX		

FIGURE 6.12 : Forme du fichier de résultats représentant les tassements

Avec :

- Sc : tassement sphérique de la fondation
- Sd : tassement déviatorique de la fondation
- Sf : tassement final de la fondation

Une partie pour le calcul de la portance en cas des combinaisons accidentelles, cette partie suit la forme suivante :

Vérifications de la portance suivant le NF EN 1998-5:				
Cas	N'(MN)	V'(MN)	M'(MNm)	Vérification de l'équation (F.1) Résultat
X	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX XXXXX

FIGURE 6.13 : Forme du fichier de résultats représentant les tassements

- N' : valeur de \bar{N} dans 6.5.6
- V' : valeur de \bar{V} dans 6.5.6
- M' : valeur de \bar{M} dans 6.5.6
- Vérification : valeur de l'expression de l'inégalité de vérification 6.5.6
- Résultat :
 - OUI : si la condition est vérifiée
 - NON : si la condition n'est pas vérifiée

Quant à la dernière partie où le calcul du ferraillage est présenté, elle doit suivre une des deux formes suivante selon la norme utilisée :

- **DTU** :

Calcul de ferraillage selon DTU: [section_B/section_L]			
Cas	Section (cm ² /m)	Section minimale (cm ² /m)	Section retenue (cm ² /m)
X	[XXXXX/XXXXX]	[XXXXX/XXXXX]	[XXXXX/XXXXX]

FIGURE 6.14 : Forme du fichier de résultats représentant le ferraillage selon DTU

- **EC2** :

Calcul de ferraillage selon EC2: [section_B/section_L]			
Cas	Méthodes des bieilles (cm ² /m)	Méthodes de moment de flexion (cm ² /m)	Section minimale (cm ² /m)
X	[XXXXX/XXXXX]	[XXXXX/XXXXX]	[XXXXX/XXXXX]

FIGURE 6.15 : Forme du fichier de résultats représentant le ferraillage selon EC2

6.5 Méthode de calcul

Pour cette version de **EKfielle**, nous effectuons les calculs conformément à l'une des deux méthodes suivantes :

- Méthode analytique, méthode basée sur les propriétés de résistance au cisaillement mesurées en laboratoire sur des échantillons de terrain
- Méthode pressiométrique, méthode fondée sur la pression limite pressiométrique Ménard

6.5.1 Calcul de la capacité portante

La méthode de calcul de la capacité portante des semelles est basée sur les principes de justification selon l'approche de calcul 2 de l'Eurocode 7 et la norme NF P94-262 : $V_d - R_0 \leq R_{v,d}$

Avec :

- V_d : la résultante des charges verticales transmise par la fondation au terrain
- R_0 : la valeur du poids du volume de sol constitué du volume de la fondation sous le terrain après travaux et des sols compris entre la fondation et le terrain après travaux : $R_0 = A * q_0$
- A : la valeur de la surface de la semelle
- q_0 : la contrainte totale verticale que l'on obtiendrait à la fin de travaux à la base de la fondation
- $R_{v,d}$: la valeur de la résistance nette du terrain sous la fondation : $R_{v,d} = \frac{A' * q_{net}}{\gamma_{R;v} * \gamma_{R;d;v}}$
- A' : la valeur de la surface effective de la semelle

- q_{net} : la contrainte associée à la résistance nette du terrain sous la fondation calculée selon la méthode de calcul utilisée
- $\gamma_{R;v}$: la valeur du facteur partiel permettant le calcul de la portance :
 - 1.4 à l'ELU
 - 2.3 à l'ELS
 - 1.2 à l'ELA
- $\gamma_{R;d;v}$: le coefficient de modèle associé à la méthode de calcul utilisée

6.5.1.1 Méthode analytique

Pour les calculs en méthode analytique, on distingue entre les conditions drainées et les conditions non drainées :

- **Conditions non drainées**

Le coefficient de modèle $\gamma_{R;d;v}$ est égale à 1,2.

La contrainte associée à la résistance nette du terrain sous la fondation doit être déterminée à partir du diagramme suivant [5] :

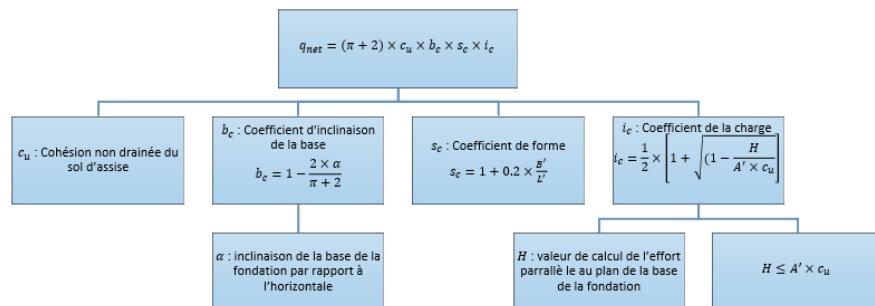


FIGURE 6.16 : Diagramme de calcul de la résistance nette du terrain par la méthode analytique en conditions non drainées

- **Conditions drainées**

Le coefficient de modèle $\gamma_{R;d;v}$ est égale à 2,0.

La contrainte associée à la résistance nette du terrain sous la fondation doit être déterminée à partir du diagramme suivant [5] :

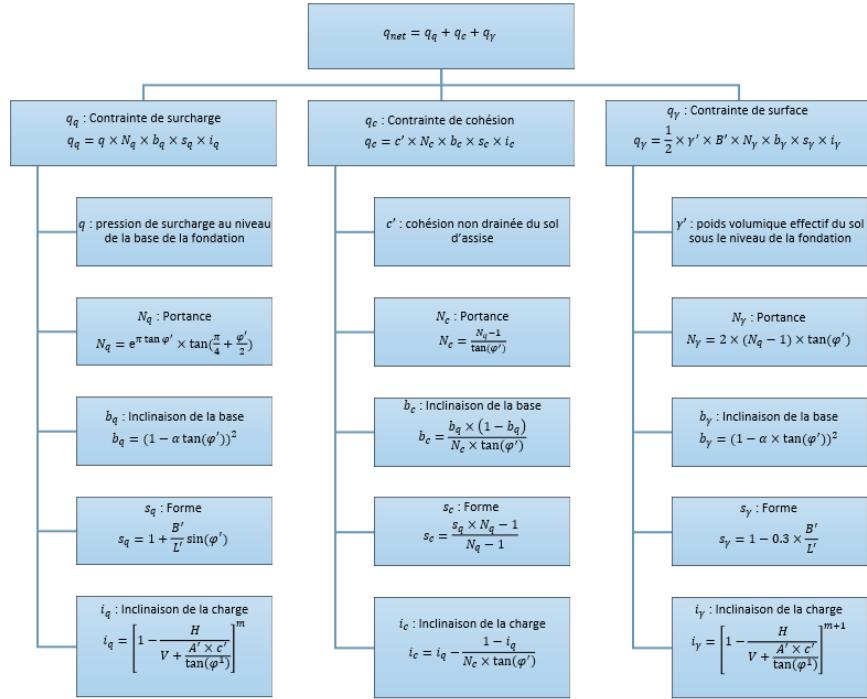


FIGURE 6.17 : Diagramme de calcul de la résistance nette du terrain par la méthode analytique en conditions drainées

Avec :

- V : la valeur de calcul de l'effort normal au plan de la base de la fondation
- H : la valeur de calcul de l'effort parrallèle au plan de la base de la fondation
- m :

- Si la composante horizontale de la charge agit dans la direction de B :

$$m = m_B = \frac{2 + \frac{B'}{L'}}{1 + \frac{B'}{L'}}$$

- Si la composante horizontale de la charge agit dans la direction de L :

$$m = m_L = \frac{2 + \frac{L'}{B'}}{1 + \frac{L'}{B'}}$$

6.5.1.2 Méthode pressiométrique

Pour les calculs en méthode pressiométrique, La contrainte associée à la résistance nette du terrain sous la fondation doit être déterminée à partir du diagramme suivant [5] :

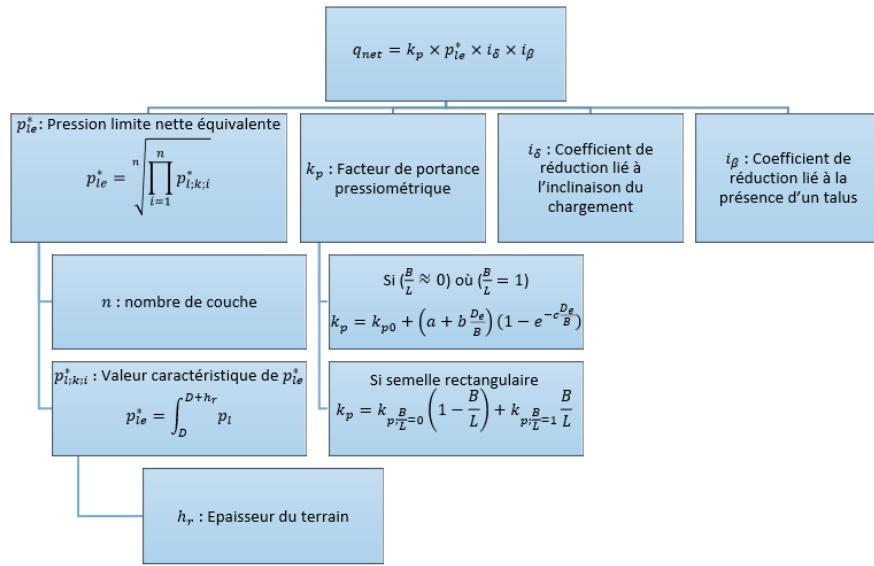


FIGURE 6.18 : Diagramme de calcul de la résistance nette du terrain par la méthode pressiométrique

Avec :

- k_{p0} , a , b et c sont des paramètres présentées dans le Tableau D.2.3 [5].
- D_e : hauteur d'encastrement équivalente : $D_e = \frac{1}{p_{le}^*} \int_d^D p_l(z) dz$
- l'épaisseur du terrain h_r est calculé selon le diagramme suivant [5] :

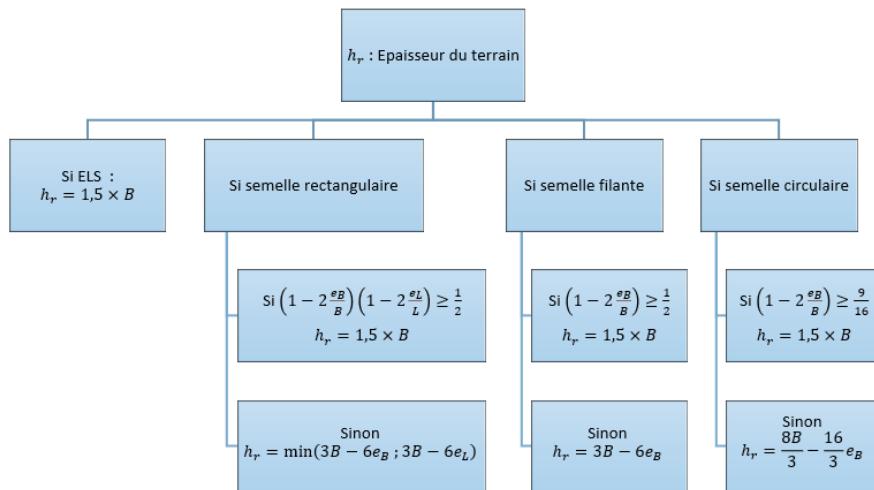


FIGURE 6.19 : Diagramme de calcul de l'épaisseur du terrain

- Le coefficient de réduction lié à l'inclinaison du chargement i_δ est calculé selon le diagramme suivant [5] :

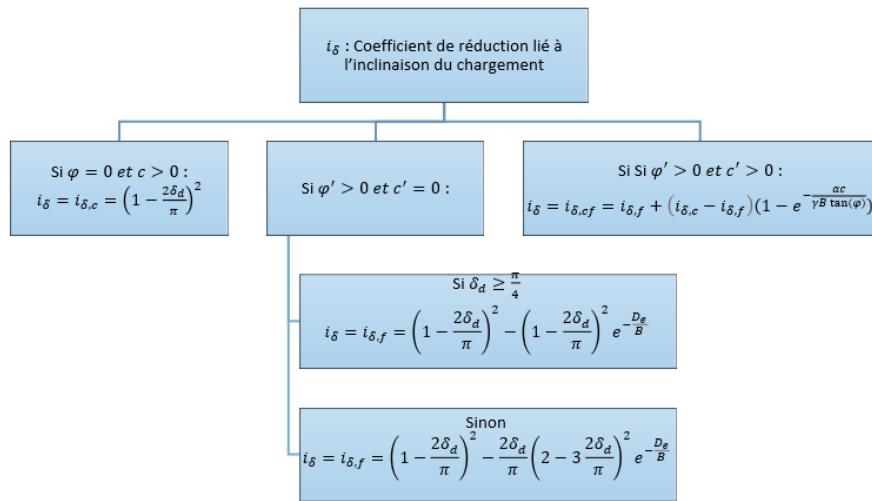


FIGURE 6.20 : Diagramme de calcul du coefficient de réduction lié à l'inclinaison du chargement

— $\delta_d = \arctan\left(\frac{H}{V}\right)$

— α : Paramètre de calage : $\alpha = 0,6$

— Le coefficient de réduction lié à la présence d'un talus i_β est calculé selon le diagramme suivant[6] :

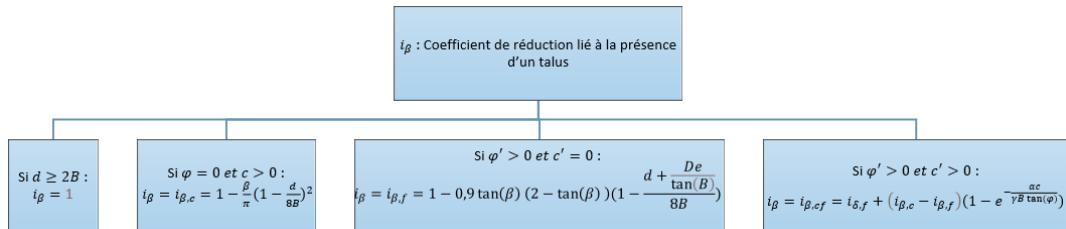


FIGURE 6.21 : Diagramme de calcul du coefficient de réduction lié à la présence d'un talus

6.5.2 Vérification du glissement

Pour les situations ELU et ELA, on doit vérifier le glissement selon l'approche de calcul 2 de l'Eurocode 7 et la norme NF P94-262. Pour démontrer que la fondation supporte la charge, il faut satisfaire les inégalités présentées dans le diagramme suivant [6] :

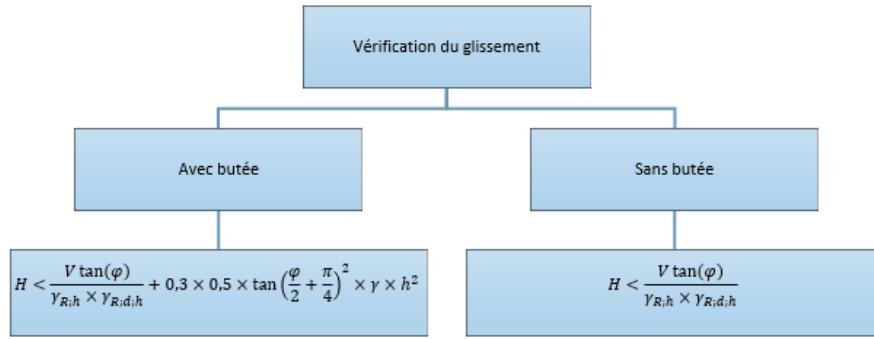


FIGURE 6.22 : Diagramme de vérification du glissement

Avec :

- $\gamma_{R;h}$: facteur partiel : $\gamma_{R;h} = 1,1$
- $\gamma_{R;d;h}$: le coefficient de modèle : $\gamma_{R;d;h} = 1,1$

6.5.3 Vérification de l'excentricité

Afin de limiter l'excentrement, il convient de vérifier les relations présentées dans le diagramme suivant [6] :

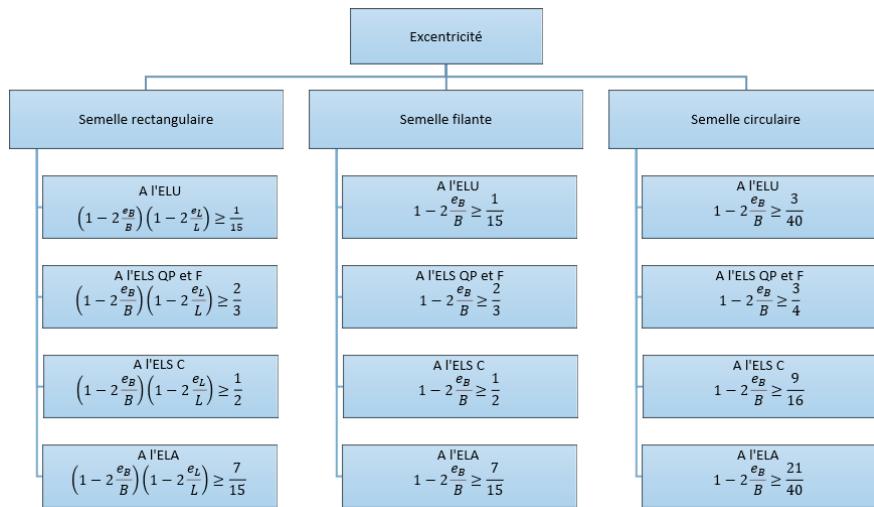


FIGURE 6.23 : Diagramme de vérification de l'excentricité

6.5.4 Vérification du soulèvement

Le soulèvement de la semelle est vérifié si la force verticale, étant négative, ne dépasse pas la force du poussée :

$$|V| < D * h * 4 * \tan\left(\frac{2}{3}\phi\right) * \frac{\gamma * h}{\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)}$$

6.5.5 Calcul du tassement

Le tassement des semelles est calculé seulement en ELS. On estime le tassement final de la fondation à partir de deux méthodes :

6.5.5.1 Méthode pressiométrique

Cette méthode permet d'estimer le tassement final d'une fondation superficielle à partir des valeurs de module pressiométrique déduites des essais pressiométriques des sondages.

Le tassement par la méthode pressiométrique est calculé comme indique le diagramme suivant [6] :

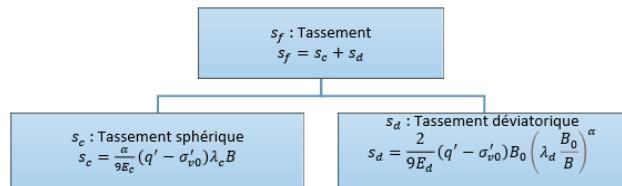


FIGURE 6.24 : Diagramme de calcul du tassement par la méthode pressiométrique

Avec :

- q' : contrainte moyenne effective appliquée au sol par la fondation
- σ'_{v0} : contrainte verticale effective au niveau de fondation
- E_c : module pressiométrique Ménard équivalent correspondant à la zone où les déformations volumétriques sont prépondérantes
- E_d : module pressiométrique Ménard équivalent correspondant à la zone où les déformations de cisaillement sont prépondérantes
- B_0 : largeur de référence
- α : coefficient rhéologique dépendant de la nature du terrain, les valeurs de α sont détaillés dans les tableaux H.2.1.1.1. et H.2.1.1.2 de la norme [6]
- λ_c, λ_d : coefficients de forme, détaillés dans le tableau H.2.1.1.3 de la norme [6]

6.5.5.2 Méthode analytique

Cette méthode permet le calcul du tassement d'une fondation superficielle partir des essais de laboratoire. Le tassement par la méthode analytique est calculé selon la formule suivante [18] :

$$s_f = c_f \frac{1 - v^2}{E} B q$$

Avec :

- c_f : coefficient dépendant de la forme et de la rigidité de la fondation, défini dans le tableau de l'annexe F.2.[fasciculr].
- v : coefficient de Poisson du sol
- E : module d'Young du sol
- q : contrainte moyenne appliquée au sol par la fondation

6.5.6 Vérification de la portance vis-à-vis au séisme

La capacité portante sismique d'une semelle superficielle doit être vérifiée au moyen de l'expression suivante [7] :

$$\frac{(1 - e\bar{F})^{c_T}(\beta\bar{V})^{c_T}}{(\bar{N})^a [(1 - m\bar{F}^k)^{k'} - \bar{N}]^b} + \frac{(1 - f\bar{F})^{C'_M}(\gamma\bar{M})^{c_M}}{(\bar{N})^c [(1 - m\bar{F}^k)^{k'} - \bar{N}]^d} - 1 \leq 0$$

Avec :

- $\bar{N} = \frac{\gamma_{Rd} N}{N_{max}}$
- $\bar{V} = \frac{\gamma_{Rd} V}{N_{max}}$
- $\bar{M} = \frac{\gamma_{Rd} M}{B N_{max}}$
- N_{max} : capacité portante ultime de la fondation sous charge verticale centrée, défini selon le type du sol :

- **Sols purement cohérents** : $N_{max} = (\pi + 2) \frac{\bar{c}}{\gamma_M} B$
- **Sols purement frottants** : $N_{max} = \frac{1}{2} \rho g \left(1 + \frac{a_v}{g}\right) B^2 N_\gamma$

- \bar{F} : force d'inertie du sol, défini selon le type du sol :

- **Sols purement cohérents** : $\bar{F} = \frac{\rho \cdot a_g \cdot S \cdot B}{\bar{c}}$
- **Sols purement frottants** : $\bar{F} = \frac{a_g}{g \tan \phi'_d}$

- \bar{c} : résistance au cisaillement
- γ_M : coefficient partiel de matériau
- ρ : masse volumique du sol
- a_g : accélération du sol
- S : paramètre caractéristique de la classe de sol
- a_v : accélération verticale du sol
- N_γ : coefficient de capacité portante
- γ_{Rd} : coefficient partiel de modèle, défini en tableau F.6 de la norme
- $a, b, c, d, e, f, m, k, k', c_T, c_M, c'_M, \beta, \gamma$: paramètres numériques, définis en tableau F.4 de la norme [7]

6.5.7 Calcul ferraillage

Le ferraillage des semelles est déterminé selon les méthodes du diagramme suivant [3] :

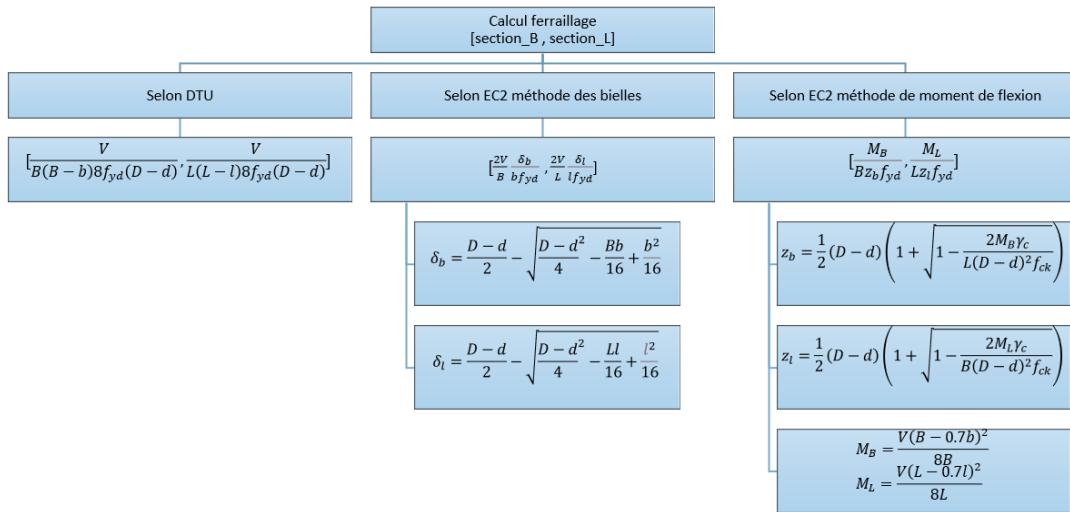


FIGURE 6.25 : Diagramme de calcul du ferraillage

6.6 Tests de validation

La validation de l'outil de calcul **EKfield** est toujours en cours.

6.7 Exemple de calcul

Un exemple de calcul est détaillé dans l'annexe.

6.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'outil **EKfond** développé dans **EKIUM**. Il convient de valider cet outil pour pouvoir l'utiliser.

Conclusion générale

Au cours de ce projet de fin d'études, j'ai développé des outils de calcul destinés au calcul du ferraillage des structures en béton armé ainsi qu'étudier la stabilité des fondations profondes et superficielles.

Ce stage a constitué pour moi une expérience très enrichissante, il a apporté un complément à ma formation d'ingénieur en génie civil et m'a permis d'approfondir mes connaissances en calcul des structures et en dimensionnement des fondations.

Grâce à mon stage chez **EKIUM**, j'ai eu la chance de non seulement mieux maîtriser les réglementations de calcul comme le **BAEL** et les **Eurocodes** mais également de découvrir les normes de calculs des centrales nucléaires telles que le **RCC-CW**.

À travers la réalisation de ce projet, j'ai pu apprendre et pratiquer la programmation **ANSYS APDL**, **Python** et **Mathcad** qui sont des atouts indispensables pour la vie professionnelle d'un ingénieur.

Dans l'ensemble, mon expérience au sein du bureau d'études génie civil Nucléaire de**EKIUM** m'a ouvert les portes pour le monde de l'énergie. Elle constitue pour moi le premier pas dans le domaine nucléaire.

Bibliographie

- [1] Documents EKIUM.
- [2] Règles BAEL 91 révisées 99.
- [3] NF EN 1992-1-1 : Eurocode 2 - Calcul des structures en béton.
- [4] RCC-CW : Règles de conception et réalisation pour le génie civil des centrales nucléaires REP.
- [5] NF P94-261 : Norme française : Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations superficielles.
- [6] NF P94-262 : Norme française : Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes.
- [7] NF EN 1998-5 : Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques.
- [8] ANSYS Parametric Design Language.
- [9] Documentation Python, www.docs.python.org/fr/3.
- [10] Documentation Anaconda, www.anaconda.com/.
- [11] Documentation Mathcad, www.mathcad.com/fr/capabilities/engineering-calculations.
- [12] « Guide d'emploi du règlement français de béton armé aux états limites - BAEL 83, » 1987.
- [13] J. ROUX, « Pratique de l'eurocode 2, » 2007.
- [14] CODE_ASTER, « Algorithme de calcul des densités de ferraillage, » 2013.
- [15] Robot Structural Analysis, www.autodesk.fr/products/robot-structural-analysis.
- [16] NF EN 1997-1 : Eurocode 7 : Calcul géotechnique - Règles générales.
- [17] Geofond, www.geos.fr/metiers/logiciels/logiciel-geofond.
- [18] DTU 13.12 : Règles pour le calcul des fondations superficielles.

ANNEXES

7.1 Annexe 1 : EKbeam

7.1.1 Exemple de calcul

On cherche à dimensionner un portique en béton armé découpé en 28 éléments de section b*h égale 0.7x1.1 m. Le dimensionnement est fait suivant une seule combinaison de charge, selon la norme EC2 à l'ELU. La résistance caractéristique du béton est de 30 MPa.

L'utilisateur introduit le fichier « fic.don » suivant :

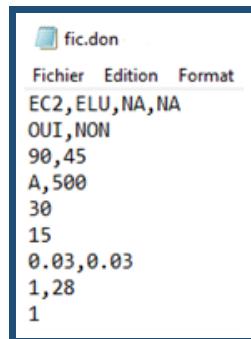


FIGURE 7.1 : Fichier « *fic.don* » pour le cas de l'exemple étudié

Le tableau suivant récapitule les données d'entrée de l'exemple étudié :

TABLEAU 7.1 : Tableau récapitulatif des données d'entrée pour le cas de l'exemple étudié

Paramètres	Données	Paramètres	Données
Règlement	EC2	Résistance caractéristique du béton	30 MPa
Calcul des aciers comprimés	Oui	Limite élastique des aciers	500 MPa
Prise en compte des sections minimale	Non	Ductilité des aciers	Classe A
Angle θ de l'inclinaison des bielles	45°	Enrobage inférieur	0.03 m
Angle α de l'inclinaison des cadres	90°	Enrobage supérieur	0.03 m
Etat limite	ELU	Nombre d'éléments	28
Type de l'ELS	NA	Nombre des combinaisons	1
Fissuration	NA	Numéro de la combinaison	1

L'outils **EKbeam** génère automatiquement le fichier récapitulatif suivant :

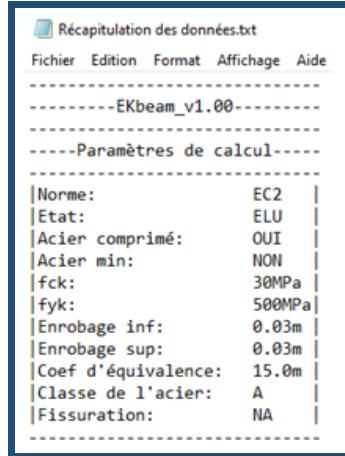


FIGURE 7.2 : Fichier « *Récapitulation des données* » pour le cas de l'exemple étudié

D'après le fichier « *fic.don* », on a une seule combinaison et 28 éléments donc « *ANSYS* » renvoi un seul fichier « *comb_1* » comportant 28 lignes :

Fichier	Édition	Format	Affichage	Aide
1.000	1.100	0.700	-3.277	-0.000
2.000	1.100	0.700	-3.277	-0.000
3.000	1.100	0.700	-3.277	-0.000
4.000	1.100	0.700	-3.277	-0.000
5.000	1.100	0.700	-3.277	-0.000
6.000	1.100	0.700	-3.277	-0.000
7.000	1.100	0.700	-3.277	-0.000
8.000	1.100	0.700	-3.277	-0.000
9.000	1.100	0.700	-3.277	0.000
10.000	1.100	0.700	-3.277	0.000
11.000	1.100	0.700	-3.277	0.000
12.000	1.100	0.700	-3.277	0.000
13.000	1.100	0.700	-4.319	-0.065
14.000	1.100	0.700	-4.319	-0.065
15.000	1.100	0.700	-4.319	-0.065
16.000	1.100	0.700	-4.319	-0.065
17.000	1.100	0.700	-4.319	-0.065
18.000	1.100	0.700	-4.319	-0.065
19.000	1.100	0.700	-4.319	-0.065
20.000	1.100	0.700	-4.319	-0.065
21.000	1.100	0.700	-1.681	-0.065
22.000	1.100	0.700	-1.681	-0.065
23.000	1.100	0.700	-1.681	-0.065
24.000	1.100	0.700	-1.681	-0.065
25.000	1.100	0.700	-1.681	-0.065
26.000	1.100	0.700	-1.681	-0.065
27.000	1.100	0.700	-1.681	-0.065
28.000	1.100	0.700	-1.681	-0.065

FIGURE 7.3 : Fichier « *comb_1* » pour le cas de l'exemple étudié

À partir des fichiers « *fic.don* » et « *comb_1* », **EKbeam** calcul les sections d'acières et envoi le fichier résultat « *Résultats de calcul* » à « *ANSYS* » :

FIGURE 7.4 : Fichier « *Résultats de calcul* » pour le cas de l'exemple étudié

Les résultats peuvent être présentés en cartographie de ferrailage ou en tableaux de valeurs.

- Section d'armatures longitudinales supérieures en cm^2 :

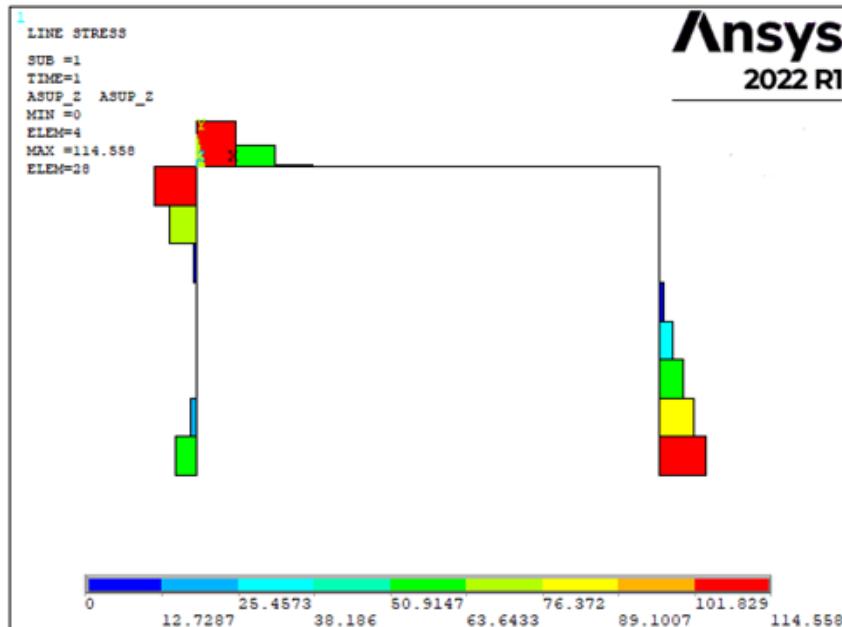


FIGURE 7.5 : Section d'armatures longitudinales supérieures pour le cas de l'exemple étudié

- Section d'armatures longitudinales inférieures en cm^2 :

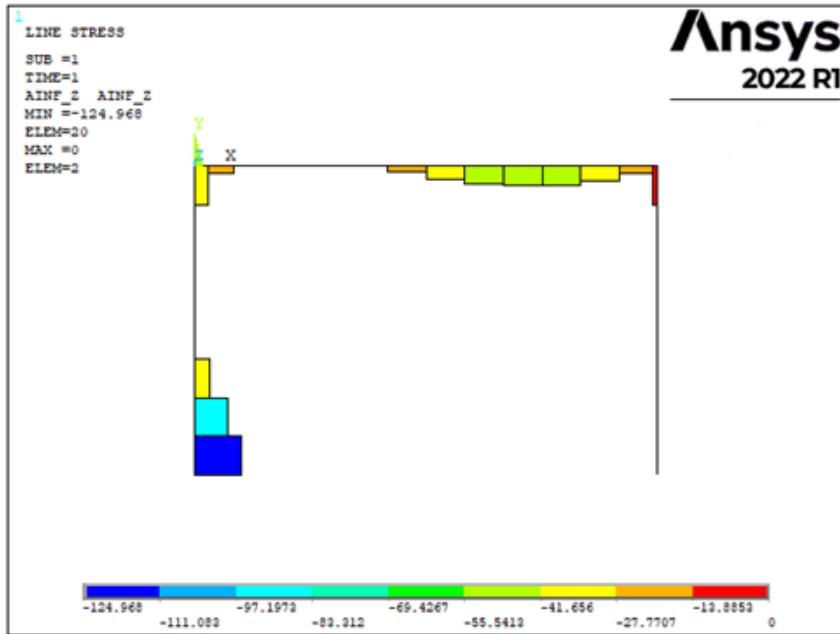


FIGURE 7.6 : Section d'armatures longitudinales inférieures pour le cas de l'exemple étudié

- Section d'armatures transversales d'effort tranchant en cm^2/m :

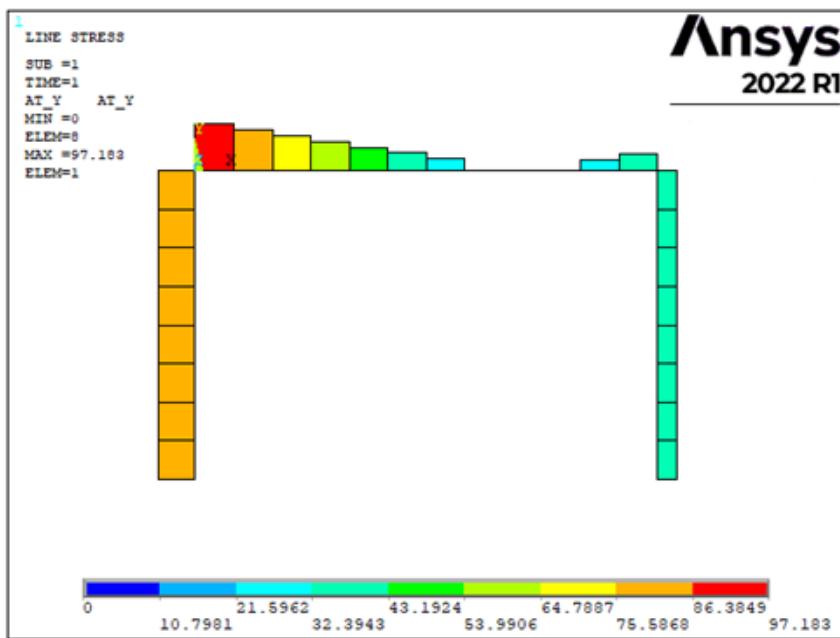


FIGURE 7.7 : Section d'armatures transversales d'effort tranchant pour le cas de l'exemple étudié

- Section d'armatures longitudinales de torsion cm^2 :

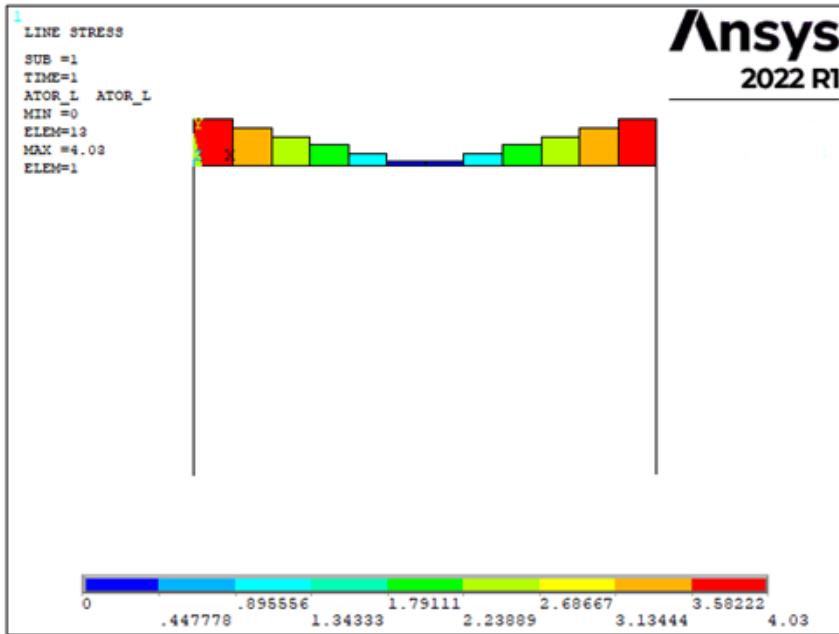


FIGURE 7.8 : Section d'armatures longitudinales de torsion pour le cas de l'exemple étudié

- Section d'armatures transversales de torsion cm^2/m :

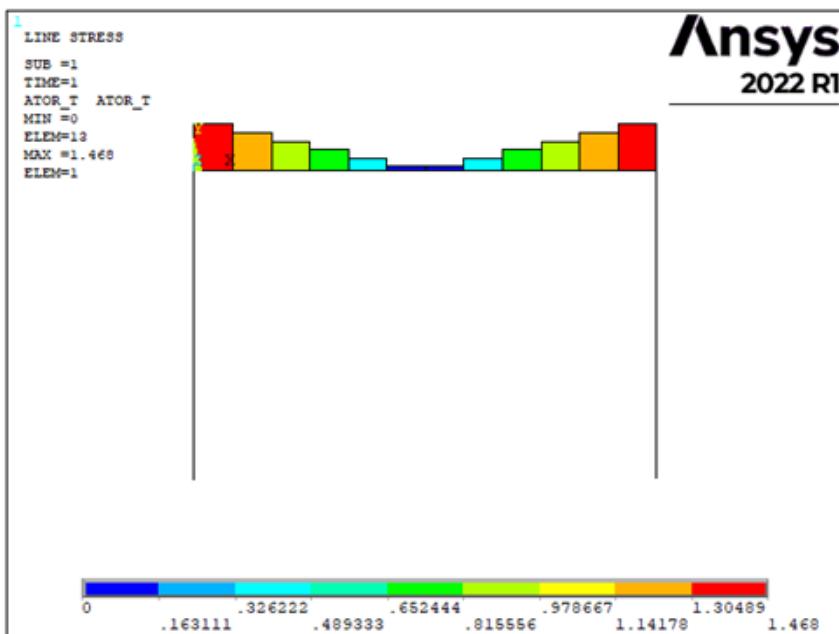


FIGURE 7.9 : Section d'armatures transversales de torsion pour le cas de l'exemple étudié

La figure suivante montre un exemple de résultats sorties en format tableau :

PRINT ELEMENT TABLE ITEMS PER ELEMENT					
***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****					
STAT ELEM	CURRENT ASUP_Z	CURRENT AINF_Z	CURRENT AT_Y	CURRENT ATOR_L	CURRENT ATOR_T
1	113.44	-18.803	97.183	4.0300	1.4680
2	54.359	0.0000	85.241	3.2970	1.2010
3	3.2440	0.0000	73.299	2.5640	0.93400
4	0.0000	0.0000	61.357	1.8320	0.66700
5	0.0000	0.0000	49.415	1.0990	0.40000
6	0.0000	-14.831	37.474	0.36600	0.13300
7	0.0000	-34.804	25.532	0.36600	0.13300
8	0.0000	-48.140	0.0000	1.0990	0.40000
9	0.0000	-53.533	0.0000	1.8320	0.66700
10	0.0000	-50.464	0.0000	2.5640	0.93400
11	0.0000	-39.207	22.236	3.2970	1.2010
12	0.0000	-20.932	34.178	4.0300	1.4680
13	105.84	-35.165	78.267	0.0000	0.0000
14	68.651	0.0000	78.267	0.0000	0.0000
15	9.7300	0.0000	78.267	0.0000	0.0000
16	0.0000	0.0000	78.267	0.0000	0.0000
17	0.0000	0.0000	78.267	0.0000	0.0000
18	0.0000	-38.720	78.267	0.0000	0.0000
19	18.069	-88.743	78.267	0.0000	0.0000
20	54.294	-124.97	78.267	0.0000	0.0000
21	0.0000	-13.300	41.152	0.0000	0.0000
22	0.0000	0.0000	41.152	0.0000	0.0000
23	0.0000	0.0000	41.152	0.0000	0.0000
24	9.8280	0.0000	41.152	0.0000	0.0000
25	32.240	0.0000	41.152	0.0000	0.0000
26	56.630	0.0000	41.152	0.0000	0.0000
27	83.714	0.0000	41.152	0.0000	0.0000
28	114.56	0.0000	41.152	0.0000	0.0000

FIGURE 7.10 : Tableau de résultats affiché dans « ANSYS »

7.1.2 Validation des test

- Test 1 : $M = 4MNm$ et $N = -4MN$

TABLEAU 7.2 : Validation test 1

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart(%)	Remarque
EC2	<i>Asup</i>	0	0	0	0.003	Validé
	<i>Ainf</i>	150.585	150.585	150.59	0.003	Validé
BAEL	<i>Asup</i>	0	0	0	0.003	Validé
	<i>Ainf</i>	151.583	151.583	151.58	0.003	Validé
RCC-CW	<i>Asup</i>	0	0	0	0.003	Validé
	<i>Ainf</i>	151.583	151.583	151.58	0.003	Validé

- Test 2 : $M = 5MNm$ et $N = -5MN$

TABLEAU 7.3 : Validation test 2

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart(%)	Remarque
EC2	<i>Asup</i>	7.625	7.625	7.62	-0.06	Validé
	<i>Ainf</i>	202.986	202.986	202.99	0.002	Validé
BAEL	<i>Asup</i>	0	0	0	0	Validé
	<i>Ainf</i>	332.151	332.151	332.15	-0.0003	Validé
RCC-CW	<i>Asup</i>	7.625	7.625	7.62	-0.06	Validé
	<i>Ainf</i>	202.986	202.986	202.99	0.002	Validé

- Test 4 : $M = 2MNm$ et $N = 0.5MN$

TABLEAU 7.4 : Validation test 3

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart (%)	Remarque
EC2	<i>Asup</i>	0	0	0	0	Validé
	<i>Ainf</i>	50.607	50.607	50.61	0.006	Validé
BAEL	<i>Asup</i>	0	0	0	0	Validé
	<i>Ainf</i>	51.657	51.657	51.66	0.006	Validé
RCC-CW	<i>Asup</i>	0	0	0	0	Validé
	<i>Ainf</i>	51.657	51.657	51.66	0.600	Validé

- Test 4 : $M = 0.5MNm$ et $N = 1MN$

TABLEAU 7.5 : Validation test 4

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart (%)	Remarque
EC2	<i>Asup</i>	0	0	0	0	Validé
	<i>Ainf</i>	3.879	3.879	3.88	0.025	Validé
BAEL	<i>Asup</i>	0	0	0	0	Validé
	<i>Ainf</i>	3.372	3.372	3.37	-0.06	Validé
RCC-CW	<i>Asup</i>	0	0	0	0	Validé
	<i>Ainf</i>	3.879	3.879	3.88	0.025	Validé

- Test 5 : $M = 4MNm$ et $N = 10MN$

TABLEAU 7.6 : Validation test 5

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart (%)	Remarque
EC2	<i>Asup</i>	75.956	75.965	75.95	0.02	Validé
	<i>Ainf</i>	22.095	22.095	22.1	0.022	Validé
BAEL	<i>Asup</i>	96.493	96.493	96.49	-0.003	Validé
	<i>Ainf</i>	16.212	16.212	16.22	0.05	Validé
RCC-CW	<i>Asup</i>	96.493	96.493	96.49	-0.003	Validé
	<i>Ainf</i>	16.212	16.212	16.22	0.05	Validé

- Test 6 : $M = 5MNm$ et $N = 5MN$

TABLEAU 7.7 : Validation test 6

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart (%)	Remarque
EC2	<i>Asup</i>	132.625	132.625	132.63	0.003	Validé
	<i>Ainf</i>	77.986	77.986	77.99	0.005	Validé
BAEL	<i>Asup</i>	188.991	188.991	188.99	-0.0005	Validé
	<i>Ainf</i>	134.043	134.043	134.04	-0.002	Validé
RCC-CW	<i>Asup</i>	132.625	132.625	132.62	0.003	Validé
	<i>Ainf</i>	77.986	77.986	77.99	0.005	Validé

- Test 7 : $M = 10MNm$ et $N = 25MN$

TABLEAU 7.8 : Validation test 7

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart (%)	Remarque
EC2	<i>Asup</i>	321.277	321.277	321.277	0	Validé
	<i>Ainf</i>	28.723	28.723	28.72	-0.01	Validé
BAEL	<i>Asup</i>	351.277	351.277	351.77	-0.028	Validé
	<i>Ainf</i>	58.723	58.723	58.72	-0.005	Validé
RCC-CW	<i>Asup</i>	351.277	351.277	351.77	-0.028	Validé
	<i>Ainf</i>	58.723	58.723	58.72	-0.005	Validé

- Test 8 : $M = 2MNm$ et $N = -1MN$

TABLEAU 7.9 : Validation test 8

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart (%)	Remarque
EC2	<i>Asup</i>	0	0	0	0	Validé
	<i>Ainf</i>	61.337	61.337	61.34	0.004	Validé
BAEL	<i>Asup</i>	0	0	0	0	Validé
	<i>Ainf</i>	61.753	61.753	61.75	-0.004	Validé
RCC-CW	<i>Asup</i>	0	0	0	0	Validé
	<i>Ainf</i>	61.753	61.753	61.75	-0.004	Validé

- Test 9 : $M = 2MNm$ et $N = -1MN$

TABLEAU 7.10 : Validation test 9

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart (%)	Remarque
EC2	<i>Asup</i>	0	0	0	0	Validé
	<i>Ainf</i>	70.552	70.552	70.55	-0.003	Validé
BAEL	<i>Asup</i>	0	0	0	0	Validé
	<i>Ainf</i>	116.298	116.298	116.3	0.001	Validé
RCC-CW	<i>Asup</i>	0	0	0	0	Validé
	<i>Ainf</i>	70.552	70.552	70.55	-0.003	Validé

- Test 10 : $M = 1MNm$ et $N = 8MN$

TABLEAU 7.11 : Validation test 10

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart (%)	Remarque
EC2	<i>Asup</i>	0	0	0	0	Validé
	<i>Ainf</i>	0	0	0	0	Validé
BAEL	<i>Asup</i>	0	0	0	0	Validé
	<i>Ainf</i>	0	0	0	0	Validé
RCC-CW	<i>Asup</i>	0	0	0	0	Validé
	<i>Ainf</i>	0	0	0	0	Validé

- Test 11 : $M = 1MNm$ et $N = 8MN$

TABLEAU 7.12 : Validation test 11

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart (%)	Remarque
EC2	<i>Asup</i>	0	0	0	0	Validé
	<i>Ainf</i>	0	0	0	0	Validé
BAEL	<i>Asup</i>	0	0	0	0	Validé
	<i>Ainf</i>	0	0	0	0	Validé
RCC-CW	<i>Asup</i>	0	0	0	0	Validé
	<i>Ainf</i>	0	0	0	0	Validé

- Test 12 : $M = 2MNm$ et $N = 25MN$

TABLEAU 7.13 : Validation test 12

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart (%)	Remarque
EC2	<i>Asup</i>	165.691	165.691	165.69	-0.0006	Validé
	<i>Ainf</i>	59.309	59.309	59.31	0.001	Validé
BAEL	<i>Asup</i>	195.691	195.691	195.69	-0.0005	Validé
	<i>Ainf</i>	89.309	89.309	89.31	0.001	Validé
RCC-CW	<i>Asup</i>	195.691	195.691	195.69	-0.0005	Validé
	<i>Ainf</i>	89.309	89.309	89.31	0.001	Validé

- Test 13 : $M = 2MNm$ et $N = 25MN$

TABLEAU 7.14 : Validation test 13

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart (%)	Remarque
EC2	<i>Asup</i>	275.099	275.099	275.1	0.0003	Validé
	<i>Ainf</i>	117.494	117.494	117.49	-0.003	Validé
BAEL	<i>Asup</i>	275.099	275.099	275.1	0.0003	Validé
	<i>Ainf</i>	117.494	117.494	117.49	-0.003	Validé
RCC-CW	<i>Asup</i>	275.099	275.099	275.1	0.0003	Validé
	<i>Ainf</i>	117.494	117.494	117.49	-0.003	Validé

- Test 14 : $N = -1MN$

TABLEAU 7.15 : Validation test 14

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart (%)	Remarque
EC2	A_{sup}	11.5	11.5	11.5	0	Validé
	A_{inf}	11.5	11.5	11.5	0	Validé
BAEL	A_{sup}	11.5	11.5	11.5	0	Validé
	A_{inf}	11.5	11.5	11.5	0	Validé
RCC-CW	A_{sup}	11.5	11.5	11.5	0	Validé
	A_{inf}	11.5	11.5	11.5	0	Validé

- Test 15 : $N = -1MN$

TABLEAU 7.16 : Validation test 15

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart (%)	Remarque
EC2	A_{sup}	12.5	12.5	12.5	0	Validé
	A_{inf}	12.5	12.5	12.5	0	Validé
BAEL	A_{sup}	20	20	20	0	Validé
	A_{inf}	20	20	20	0	Validé
RCC-CW	A_{sup}	12.5	12.5	12.5	0	Validé
	A_{inf}	12.5	12.5	12.5	0	Validé

- Test 16 : $N = 8MN$

TABLEAU 7.17 : Validation test 16

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart (%)	Remarque
EC2	A_{sup}	0	0	0	0	Validé
	A_{inf}	0	0	0	0	Validé
BAEL	A_{sup}	0	0	0	0	Validé
	A_{inf}	0	0	0	0	Validé
RCC-CW	A_{sup}	0	0	0	0	Validé
	A_{inf}	0	0	0	0	Validé

- Test 17 : $N = 8MN$

TABLEAU 7.18 : Validation test 17

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart (%)	Remarque
EC2	<i>Asup</i>	0	0	0	0	Validé
	<i>Ainf</i>	0	0	0	0	Validé
BAEL	<i>Asup</i>	0	0	0	0	Validé
	<i>Ainf</i>	0	0	0	0	Validé
RCC-CW	<i>Asup</i>	0	0	0	0	Validé
	<i>Ainf</i>	0	0	0	0	Validé

- Test 18 : $N = 20MN$

TABLEAU 7.19 : Validation test 18

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart (%)	Remarque
EC2	<i>Asup</i>	50	50	50	0	Validé
	<i>Ainf</i>	50	50	50	0	Validé
BAEL	<i>Asup</i>	80	80	80	0	Validé
	<i>Ainf</i>	80	80	80	0	Validé
RCC-CW	<i>Asup</i>	80	80	80	0	Validé
	<i>Ainf</i>	80	80	80	0	Validé

- Test 19 : $N = 20MN$

TABLEAU 7.20 : Validation test 19

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart (%)	Remarque
EC2	<i>Asup</i>	103.704	103.704	103.7	-0.003	Validé
	<i>Ainf</i>	103.704	103.704	103.7	-0.003	Validé
BAEL	<i>Asup</i>	103.7	103.7	103.7	0	Validé
	<i>Ainf</i>	103.7	103.7	103.7	0	Validé
RCC-CW	<i>Asup</i>	103.704	103.704	103.7	-0.003	Validé
	<i>Ainf</i>	103.704	103.704	103.7	-0.003	Validé

- Test 20 : $T = 1MNm$

TABLEAU 7.21 : Validation Test 20

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart (%)	Remarque
EC2	<i>Asup</i>	69.379	69.379	69.38	0.001	Validé
	<i>Ainf</i>					Validé
BAEL	<i>Asup</i>	69.379	69.379	69.38	0.001	Validé
	<i>Ainf</i>					Validé
RCC-CW	<i>Asup</i>	69.379	69.379	69.38	0.001	Validé
	<i>Ainf</i>					Validé

- Test 21 : $T = 3MNm$

TABLEAU 7.22 : Validation test 21

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart	Remarque
EC2	<i>Asup</i>	9999	9999	####	####	Validé
	<i>Ainf</i>	9999	9999	####	####	Validé
BAEL	<i>Asup</i>	9999	9999	####	####	Validé
	<i>Ainf</i>	9999	9999	####	####	Validé
RCC-CW	<i>Asup</i>	9999	9999	####	####	Validé
	<i>Ainf</i>	9999	9999	####	####	Validé

- Test 22 : $V = 1MN$

TABLEAU 7.23 : Validation test 22

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart (%)	Remarque
EC2	<i>At</i>	26.346	26.346	26.35	0.015	Validé
BAEL	<i>At</i>	11.626	11.626	11.63	0.034	Validé
RCC-CW	<i>At</i>	11.626	11.626	11.63	0.034	Validé

- Test 23 : $V = 3MN$

TABLEAU 7.24 : Validation test 23

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart	Remarque
EC2	<i>At</i>	9999	9999	####	####	Validé
BAEL	<i>At</i>	9999	9999	####	####	Validé
RCC-CW	<i>At</i>	9999	9999	####	####	Validé

- Test 24 : $V = 0.1MN$

TABLEAU 7.25 : Validation test 24

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart (%)	Remarque
EC2	<i>At</i>	0	0	0	0	Validé
BAEL	<i>At</i>					Validé
RCC-CW	<i>At</i>					Validé

- Test 2 : $T = 1MNm$

TABLEAU 7.26 : Validation test 25

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart (%)	Remarque
EC2	<i>At</i>	25.591	25.591	25.59	-0.004	Validé
BAEL	<i>At</i>	25.591	25.591	25.59	-0.004	Validé
RCC-CW	<i>At</i>	25.591	25.591	25.59	-0.004	Validé

- Test 26 : $T = 3MNm$

TABLEAU 7.27 : Validation test 23

	Acier (cm ²)	Ekbeam	Mathcad	Référence	Ecart	Remarque
EC2	<i>At</i>	9999	9999	####	####	Validé
BAEL	<i>At</i>	9999	9999	####	####	Validé
RCC-CW	<i>At</i>	9999	9999	####	####	Validé

7.2 Annexe 2 : EKfer

7.2.1 Exemple de calcul

On cherche à dimensionner un cadre, une dalle appuyée sur deux voiles, en béton armé en 160 éléments. Le dimensionnement est fait suivant une seule combinaison de charge, selon la norme EC2 à l'ELU. La résistance caractéristique du béton est de 30 MPa. Le pas de l'angle est 5° .

On définit la section en béton suivante :

— Dalle :

- $L = 4m$
- $b = 0,2m$
- $h = 4m$
- $c = c' = 0,06m$

— Voiles :

- $L = 4m$
- $b = 0,2m$
- $h = 2,7m$
- $c = c' = 0,06m$

On définit le cas de charge suivant :

- Une charge de pression uniforme appliquée sur la dalle : $0,04MN/m^2$
- Une charge de pression uniforme appliquée sur une voile : $0,05MN/m^2$

L'utilisateur introduit le fichier « fic.don » suivant :

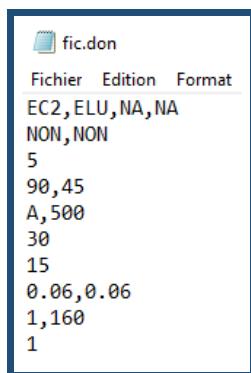


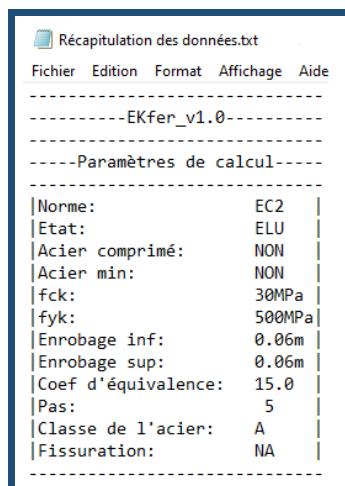
FIGURE 7.11 : Fichier « fic.don » pour le cas de l'exemple étudié

Le tableau suivant récapitule les données d'entrée de l'exemple étudié :

TABLEAU 7.28 : Tableau récapitulatif des données d'entrée pour le cas de l'exemple étudié

Paramètres	Données	Paramètres	Données
Règlement	EC2	Résistance caractéristique du béton	30 MPa
Calcul des aciers comprimés	Oui	Limite élastique des aciers	500 MPa
Prise en compte des sections minimale	Non	Ductilité des aciers	Classe A
Angle θ de l'inclinaison des bielles	45°	Enrobage inférieur	0.06 m
Angle α de l'inclinaison des cadres	90°	Enrobage supérieur	0.06 m
Etat limite	ELU	Nombre d'éléments	160
Type de l'ELS	NA	Pas de l'angle	5°
Fissuration	NA	Numéro de la combinaison	1

L'outils **EKbeam** génère automatiquement le fichier récapitulatif suivant :



```

Récapitulation des données.txt
Fichier Edition Format Affichage Aide
-----EKfer_v1.0-----
-----Paramètres de calcul-----
|Norme:          EC2|
|Etat:           ELU|
|Aacier comprimé: NON|
|Aacier min:      NON|
|fck:            30MPa|
|fyk:            500MPa|
|Enrobage inf:   0.06m|
|Enrobage sup:   0.06m|
|Coef d'équivalence: 15.0|
|Pas:             5|
|Classe de l'acier: A|
|Fissuration:     NA|
-----
```

FIGURE 7.12 : Fichier « Récapitulation des données » pour le cas de l'exemple étudié

Chapitre 7. Annexes

D'après le fichier « *fic.don* », on a une seule combinaison et 160 éléments donc « *ANSYS* » renvoie un seul fichier « *comb_1* » comportant 160 lignes :

Fichier	Edition	Format	Affichage	Aide
1.000000	0.200000	1.000000	-0.007269	-0.094599
2.000000	0.200000	1.000000	-0.014475	-0.084764
3.000000	0.200000	1.000000	-0.013047	-0.085258
4.000000	0.200000	1.000000	-0.014323	-0.085020
5.000000	0.200000	1.000000	-0.014323	-0.085020
6.000000	0.200000	1.000000	-0.013047	-0.085258
7.000000	0.200000	1.000000	-0.014475	-0.084764
8.000000	0.200000	1.000000	-0.007269	-0.094599
9.000000	0.200000	1.000000	-0.001296	-0.085762
10.000000	0.200000	1.000000	-0.004538	-0.089633
11.000000	0.200000	1.000000	-0.009128	-0.086837
12.000000	0.200000	1.000000	-0.008966	-0.087409
13.000000	0.200000	1.000000	-0.008966	-0.087409
14.000000	0.200000	1.000000	-0.009128	-0.086837
15.000000	0.200000	1.000000	-0.004538	-0.089633
16.000000	0.200000	1.000000	-0.001296	-0.085762
17.000000	0.200000	1.000000	0.001134	-0.083447
18.000000	0.200000	1.000000	-0.002119	-0.088391
19.000000	0.200000	1.000000	-0.004985	-0.088762
20.000000	0.200000	1.000000	-0.005601	-0.089041
21.000000	0.200000	1.000000	-0.005601	-0.089041
22.000000	0.200000	1.000000	-0.004985	-0.088762
23.000000	0.200000	1.000000	-0.002119	-0.088391
24.000000	0.200000	1.000000	0.001134	-0.083447
25.000000	0.200000	1.000000	-0.002986	-0.083015
26.000000	0.200000	1.000000	-0.002823	-0.086803
27.000000	0.200000	1.000000	-0.003022	-0.091608
28.000000	0.200000	1.000000	-0.005544	-0.088215
29.000000	0.200000	1.000000	-0.005544	-0.088215
30.000000	0.200000	1.000000	-0.003022	-0.091608
31.000000	0.200000	1.000000	-0.003022	-0.090709

FIGURE 7.13 : Fichier « *comb_1* » pour le cas de l'exemple étudié

À partir des fichiers « *fic.don* » et « *comb_1* », **EKfer** calcul les sections d'acières et envoie le fichier résultat « *Résultats de calcul* » à « *ANSYS* » :

Résultats de calcul.txt

Fichier Edition Format Affichage Aide

1.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.789,1.0,0.5,177,1.0,0,0,0,0
2.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.1,225,1.0,5,609,1.0,0,0,0,0
3.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.1,112,1.0,5,433,1.0,0,0,0,0
4.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.1,06,1.0,5,38,1.0,0,0,0,0
5.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.1,06,1.0,5,38,1.0,0,0,0,0
6.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.1,112,1.0,5,433,1.0,0,0,0,0
7.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.1,225,1.0,5,609,1.0,0,0,0,0
8.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.789,1.0,0.5,177,1.0,0,0,0,0
9.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.295,1.0,2,434,1.0,0,0,0,0
10.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.716,1.0,2,206,1.0,0,0,0,0
11.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.676,1.0,2,302,1.0,0,0,0,0
12.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.586,1.0,2,243,1.0,0,0,0,0
13.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.586,1.0,2,243,1.0,0,0,0,0
14.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.676,1.0,2,302,1.0,0,0,0,0
15.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.716,1.0,2,206,1.0,0,0,0,0
16.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.295,1.0,2,434,1.0,0,0,0,0
17.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.204,1.0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
18.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.117,1.0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
19.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.127,1.0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
20.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.073,1.0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
21.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.073,1.0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
22.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.127,1.0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
23.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.117,1.0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
24.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.204,1.0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
25.0,0.294,1.0,1,161,1.0,0,0,1.0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
26.0,0.294,1.0,0,805,1.0,0,0,1.0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
27.0,0.395,1.0,0,681,1.0,0,0,1.0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
28.0,0,341,1.0,0,772,1.0,0,0,1.0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
29.0,0,341,1.0,0,772,1.0,0,0,1.0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
30.0,0,395,1.0,0,681,1.0,0,0,1.0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
31.0,0,395,1.0,0,681,1.0,0,0,1.0,0,0,0,0,0,0,0,0,0

FIGURE 7.14 : Fichier « *Résultats de calcul* » pour le cas de l'exemple étudié

Les résultats peuvent être présentés en cartographie de ferraillage ou en tableaux de valeurs.

- Section d'armatures longitudinales supérieures dans la direction X, en cm^2 :

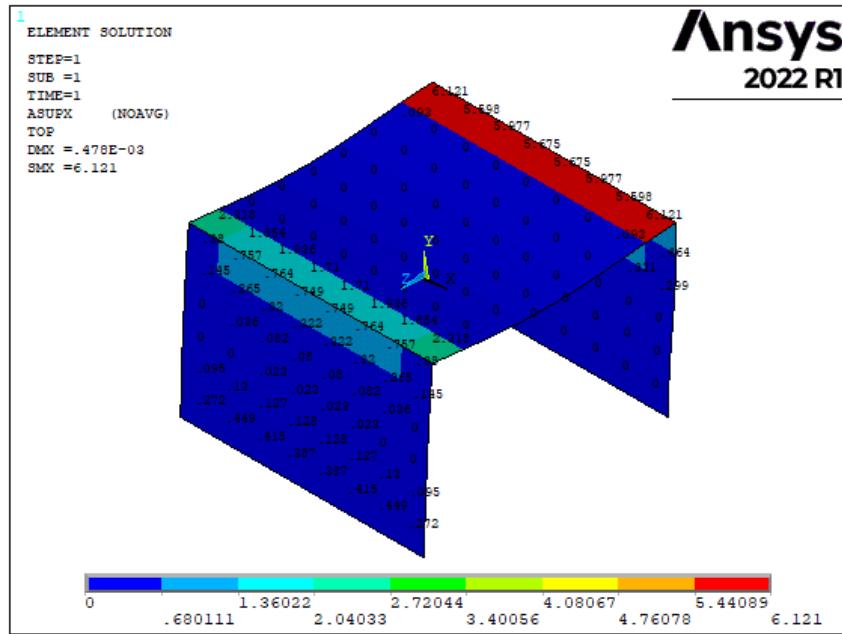


FIGURE 7.15 : Section d'armatures longitudinales supérieures dans la direction X pour le cas de l'exemple étudié

- Section d'armatures longitudinales supérieures dans la direction Y, en cm^2 :

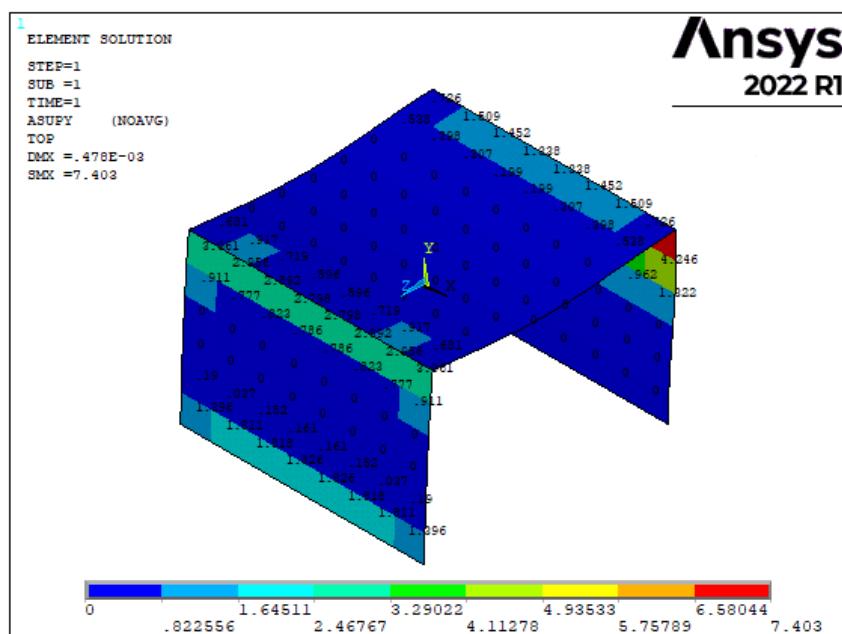


FIGURE 7.16 : Section d'armatures longitudinales supérieures dans la direction Y pour le cas de l'exemple étudié

- Section d'armatures longitudinales inférieures dans la direction X, en cm^2 :

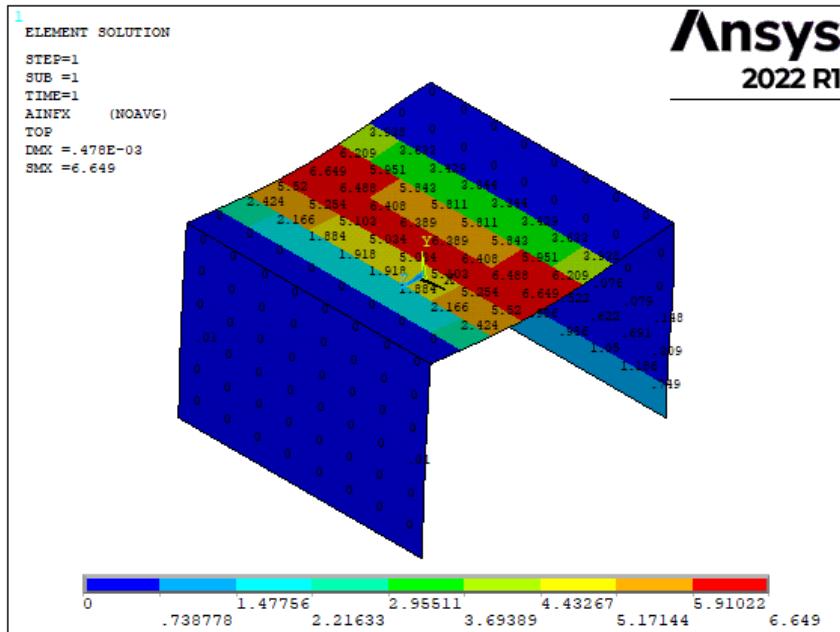


FIGURE 7.17 : Section d'armatures longitudinales inférieures dans la direction X pour le cas de l'exemple étudié

- Section d'armatures longitudinales inférieures dans la direction Y, en cm^2 :

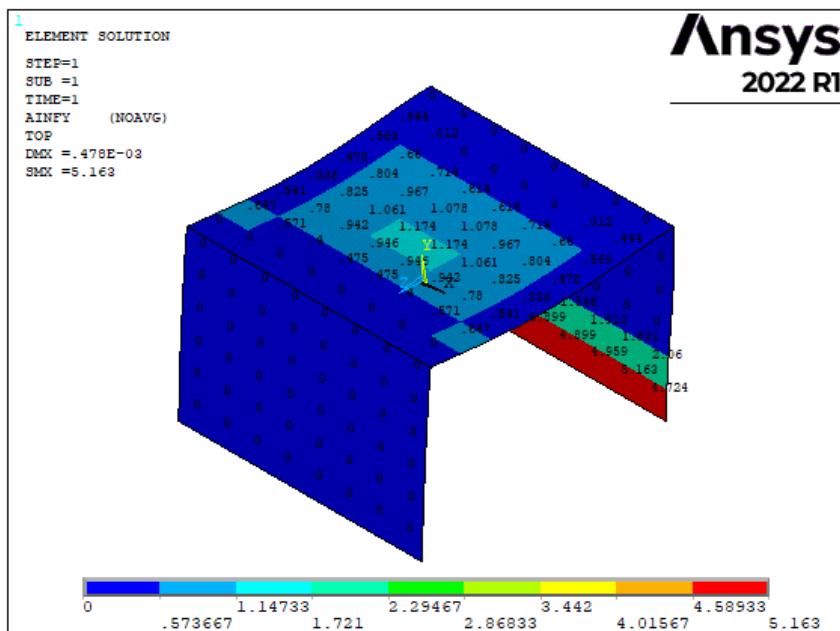


FIGURE 7.18 : Section d'armatures longitudinales inférieures dans la direction Y pour le cas de l'exemple étudié

7.2.2 Validation des test

Nous confrontons les résultats obtenus par notre outil de calcul à ceux obtenus par le logiciel « *Robot Structural Analysis* ».

Le tableau suivant illustre la comparaison des maximums des valeurs trouvées par **EKfer** et « *Robot Structural Analysis* » :

TABLEAU 7.29 : Validation de l'algorithme d'optimisation

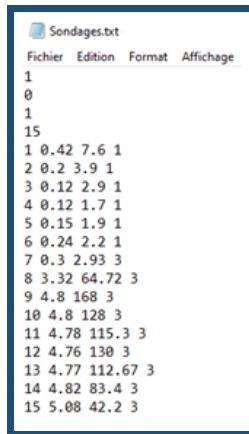
Acier (cm ²)	EKfer	<i>Robot Structural Analysis</i>	Ecart (%)
AXI	6,649	6,81	2,364
AYI	5,163	5,26	1,844
AXS	6,161	6,40	3,734
AYS	7,403	7,60	2,592

7.3 Annexe 3 : EKfond

7.3.1 Exemple de calcul

On cherche à calculer la capacité portante d'un pieu Foré simple (pieux et barrettes) de diamètre 0.4m et de longueur 10m selon la procédure de modèle de terrain, tout en vérifiant le béton. La résistance caractéristique du béton utilisé est 30 MPa.

L'utilisateur introduit le sondage suivant :



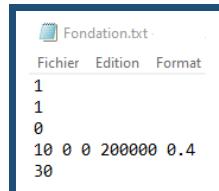
```

Sondages.txt
Fichier Edition Format Affichage
1
0
1
15
1 0.42 7.6 1
2 0.2 3.9 1
3 0.12 2.9 1
4 0.12 1.7 1
5 0.15 1.9 1
6 0.24 2.2 1
7 0.3 2.93 3
8 3.32 64.72 3
9 4.8 168 3
10 4.8 128 3
11 4.78 115.3 3
12 4.76 130 3
13 4.77 112.67 3
14 4.82 83.4 3
15 5.08 42.2 3

```

FIGURE 7.19 : Fichier « *Sondages* » pour le cas de l'exemple étudié

Le fichier « *Fondation.txt* » doit être comme suit :



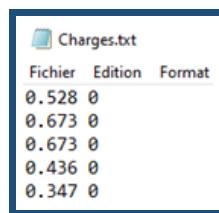
```

Fondation.txt
Fichier Edition Format
1
1
0
10 0 0 200000 0.4
30

```

FIGURE 7.20 : Fichier « *Fondation* » pour le cas de l'exemple étudié

Les sollicitations appliquées sur la fondation sont présentées dans le fichier « *Charges.txt* » :



```

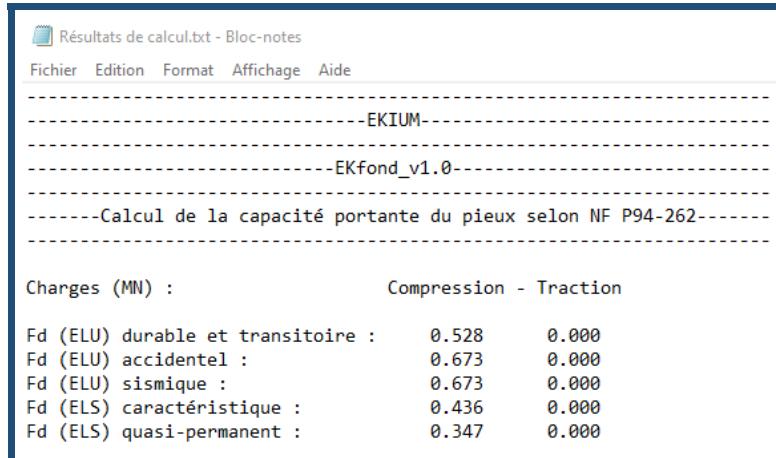
Charges.txt
Fichier Edition Format
0.528 0
0.673 0
0.673 0
0.436 0
0.347 0

```

FIGURE 7.21 : Fichier « *Charges* » pour le cas de l'exemple étudié

Le fichier « Résultats de calcul.txt » est composé de trois partie.

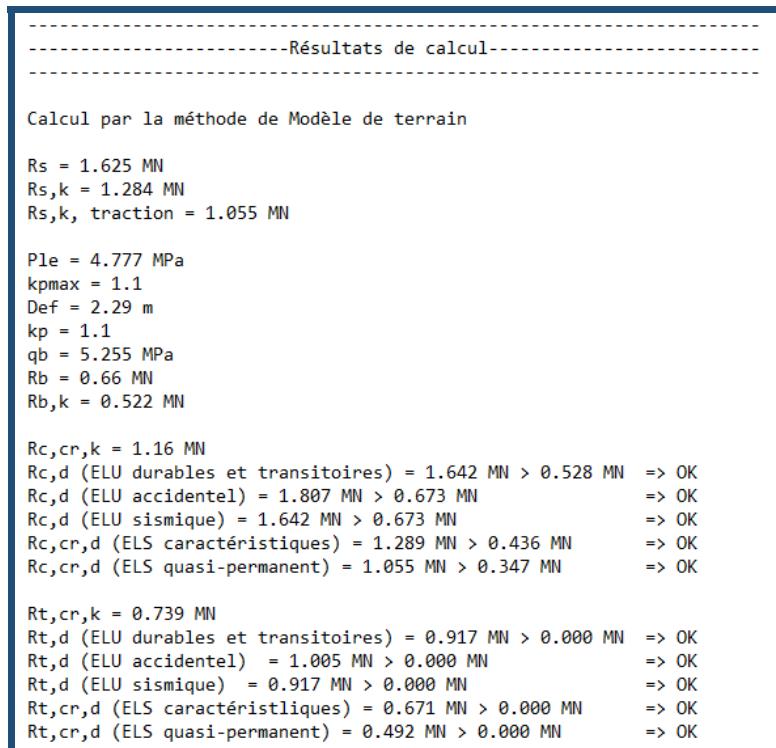
La première partie est celle de la récapitulation des sollicitations :



Charges (MN) :	Compression - Traction
F _d (ELU) durable et transitoire :	0.528 0.000
F _d (ELU) accidentel :	0.673 0.000
F _d (ELU) sismique :	0.673 0.000
F _d (ELS) caractéristique :	0.436 0.000
F _d (ELS) quasi-permanent :	0.347 0.000

FIGURE 7.22 : Fichier « *Résultats de calcul* » partie des charges pour le cas de l'exemple étudié

La deuxième partie est celle des résultats de calcul :



```

-----Résultats de calcul-----
-----Calcul par la méthode de Modèle de terrain

Rs = 1.625 MN
Rs,k = 1.284 MN
Rs,k, traction = 1.055 MN

Ple = 4.777 MPa
kpmax = 1.1
Def = 2.29 m
kp = 1.1
qb = 5.255 MPa
Rb = 0.66 MN
Rb,k = 0.522 MN

Rc,cr,k = 1.16 MN
Rc,d (ELU durables et transitoires) = 1.642 MN > 0.528 MN => OK
Rc,d (ELU accidentel) = 1.807 MN > 0.673 MN => OK
Rc,d (ELU sismique) = 1.642 MN > 0.673 MN => OK
Rc,cr,d (ELS caractéristiques) = 1.289 MN > 0.436 MN => OK
Rc,cr,d (ELS quasi-permanent) = 1.055 MN > 0.347 MN => OK

Rt,cr,k = 0.739 MN
Rt,d (ELU durables et transitoires) = 0.917 MN > 0.000 MN => OK
Rt,d (ELU accidentel) = 1.005 MN > 0.000 MN => OK
Rt,d (ELU sismique) = 0.917 MN > 0.000 MN => OK
Rt,cr,d (ELS caractéristiques) = 0.671 MN > 0.000 MN => OK
Rt,cr,d (ELS quasi-permanent) = 0.492 MN > 0.000 MN => OK

```

FIGURE 7.23 : Fichier « *Résultats de calcul* » partie des calculs pour le cas de l'exemple étudié

La troisième partie est pour la vérification du béton :

```

-----Vérification du béton-----
-----



k1 = 1.3
k2 = 1.15
k3 = 1
Cmax = 35 MPa
fck* = 20.07 MPa

Vérification en combianison caractéristique :
sigmacmoydcaractéristique = 3.47 MPa
Sigma,moy,ELS = 6.02 MPa >= 3.47 MPa => OK
sigmacmaxdcaractéristique = 3.47 MPa
Sigma,max,ELS = 12.04 MPa >= 3.47 MPa => OK

Vérification en combianison quasi-permanent :
sigmacmoydquasipermanent = 2.761 MPa
Sigma,moy,ELS = 6.02 MPa >= 2.761 MPa => OK
sigmacmaxdquasipermanent = 2.761 MPa
Sigma,max,ELS = 12.04 MPa >= 2.761 MPa => OK

```

FIGURE 7.24 : Fichier « *Résultats de calcul* » partie des vérifications pour le cas de l'exemple étudié

Quant aux graphes, ils sont présentés ci-dessous :

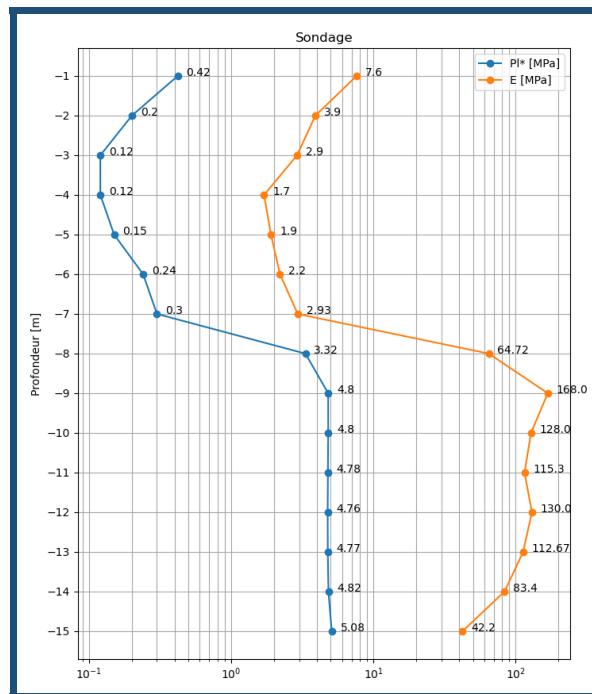


FIGURE 7.25 : Graphe « *Sondage* » pour le cas de l'exemple étudié

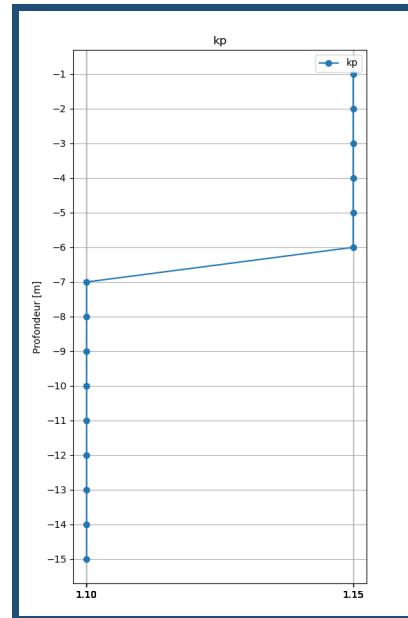


FIGURE 7.26 : Graphe « kp » pour le cas de l'exemple étudié

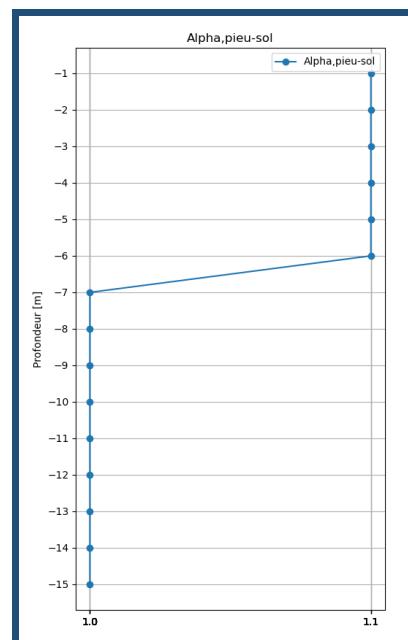


FIGURE 7.27 : Graphe « $\alpha_{pieu-sol}$ » pour le cas de l'exemple étudié

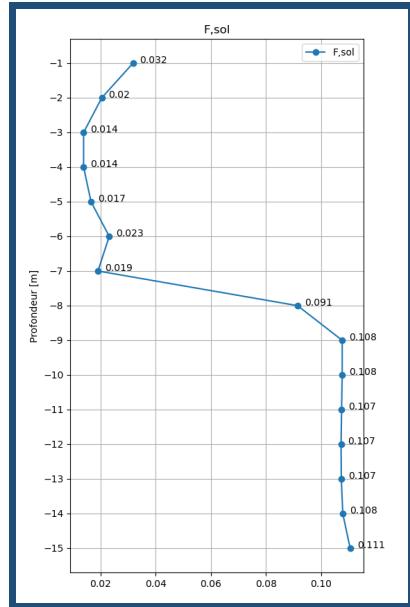


FIGURE 7.28 : Graphe « f_{sol} » pour le cas de l'exemple étudié

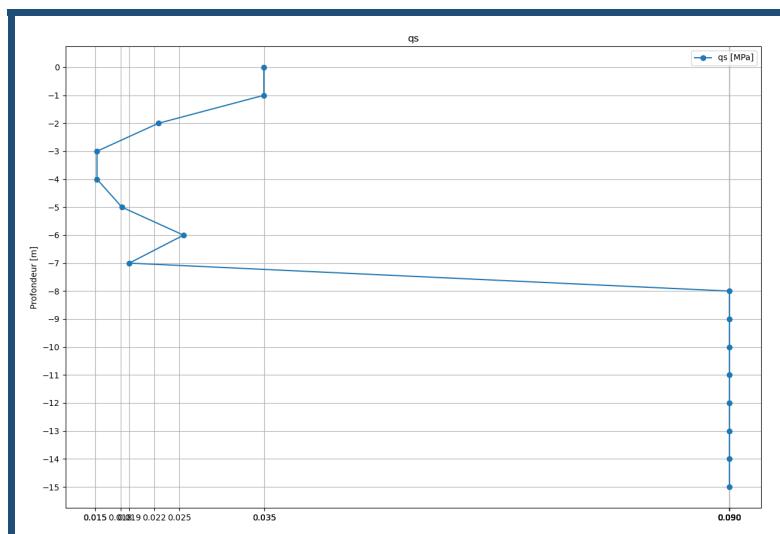


FIGURE 7.29 : Graphe « qs » pour le cas de l'exemple étudié

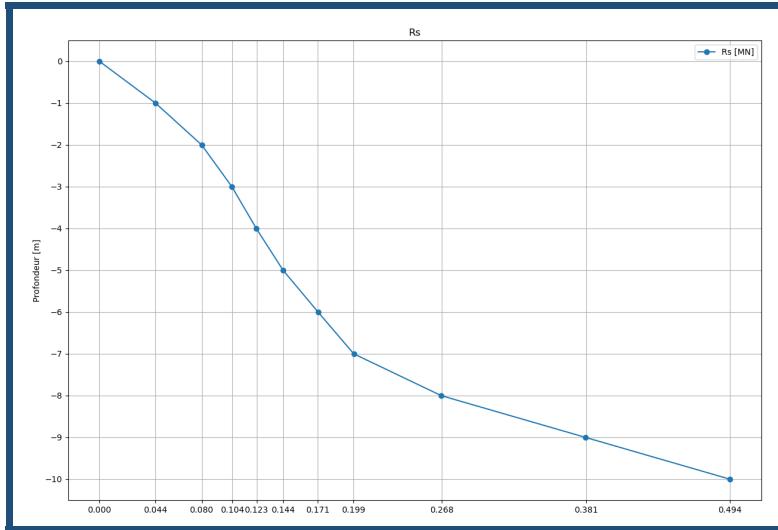


FIGURE 7.30 : Graphe « R_s » pour le cas de l'exemple étudié

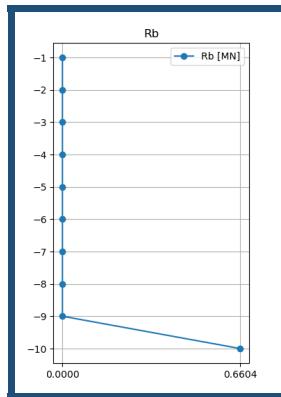


FIGURE 7.31 : Graphe « R_b » pour le cas de l'exemple étudié

7.3.2 Validation des test

7.3.2.1 Catégorie 1

- Cas 1

TABLEAU 7.30 : Validation cas 1 pour la catégorie 1

	EKfond	Geofond	Ecart	Remarque
$R_s(MN)$	0,463	0,47	-1,49%	Validé
$P_{le}(MPa)$	4,777	4,790	-0,27%	Validé
$D_{ef}(m)$	2,290	2,290	-0,00%	Validé
k_p	1,1	1,1	0,00%	Validé

$q_b(MPa)$	5,255	5,260	-0,10%	Validé
$R_b(MN)$	0,660	0,661	-0,15%	Validé
$R_{c;ck;k}(MN)$	0,517	0,522	-0,96%	Validé
$R_{cd} \text{ fondamental}(MN)$	0,807	0,813	-0,74%	Validé
$R_{cd} \text{ accidentel}(MN)$	0,888	0,894	-0,67%	Validé
$R_{cd} \text{ sismique}(MN)$	0,807	0,813	-0,74%	Validé
$R_{cd} \text{ caractristique}(MN)$	0,575	0,579	-0,69%	Validé
$R_{cd} \text{ quasi_permanant}(MN)$	0,470	0,474	-0,84%	Validé
$R_{t;ck;k}(MN)$	0,210	0,214	-1,87%	Validé
$R_{td} \text{ fondamental}(MN)$	0,261	0,265	-1,51%	Validé
$R_{td} \text{ accidentel}(MN)$	0,286	0,291	-1,72%	Validé
$R_{td} \text{ sismique}(MN)$	0,261	0,265	-1,51%	Validé
$R_{td} \text{ caractristique}(MN)$	0,191	0,194	-1,55%	Validé
$R_{td} \text{ quasi_permanant}(MN)$	0,140	0,142	-1,41%	Validé

- Cas 2

TABLEAU 7.31 : Validation cas 2 pour la catégorie 1

	EKFond	Geofond	Ecart	Remarque
$R_s(MN)$	0,419	0,426	-1,64%	Validé
$P_{le}(MPa)$	4,777	4,79	-0,27%	Validé
$D_{ef}(m)$	2,290	2,29	0,00%	Validé
k_p	1,1	1,1	0,00%	Validé
$q_b(MPa)$	5,255	5,26	-0,10%	Validé
$R_b(MN)$	0,660	0,661	-0,15%	Validé
$R_{c;ck;k}(MN)$	0,493	0,497	-0,80%	Validé
$R_{cd} \text{ fondamental}(MN)$	0,776	0,782	-0,77%	Validé
$R_{cd} \text{ accidentel}(MN)$	0,853	0,860	-0,81%	Validé
$R_{cd} \text{ sismique}(MN)$	0,776	0,782	-0,77%	Validé
$R_{cd} \text{ caractristique}(MN)$	0,548	0,552	-0,72%	Validé
$R_{cd} \text{ quasi_permanant}(MN)$	0,448	0,452	-0,88%	Validé

$R_{t;ck;k}(MN)$	0,190	0,194	-2,06%	Validé
R_{td} fondamental(MN)	0,236	0,241	-2,07%	Validé
R_{td} accidentel(MN)	0,259	0,264	-1,89%	Validé
R_{td} sismique(MN)	0,236	0,241	-2,07%	Validé
R_{td} caractristique(MN)	0,173	0,176	-1,70%	Validé
R_{td} quasi_permanant(MN)	0,127	0,129	-1,55%	Validé

- Cas 3

TABLEAU 7.32 : Validation cas 3 pour la catégorie 1

	EKFond	Geofond	Ecart	Remarque
$R_s(MN)$	0,383	0,390	-1,79%	Validé
$P_{le}(MPa)$	4,777	4,790	-0,27%	Validé
$D_{ef}(m)$	2,290	2,290	0,00%	Validé
k_p	1,1	1,1	0,00%	Validé
$q_b(MPa)$	5,255	5,260	-0,10%	Validé
$R_b(MN)$	0,660	0,661	-0,15%	Validé
$R_{c;ck;k}(MN)$	0,473	0,477	-0,84%	Validé
R_{cd} fondamental(MN)	0,750	0,756	-0,79%	Validé
R_{cd} accidentel(MN)	0,825	0,831	-0,72%	Validé
R_{cd} sismique(MN)	0,750	0,756	-0,79%	Validé
R_{ca} caractristique(MN)	0,525	0,530	-0,94%	Validé
R_{cd} quasi_permanant(MN)	0,430	0,434	-0,92%	Validé
$R_{t;ck;k}(MN)$	0,174	0,177	-1,69%	Validé
R_{td} fondamental(MN)	0,216	0,220	-1,82%	Validé
R_{td} accidentel(MN)	0,237	0,241	-1,66%	Validé
R_{td} sismique(MN)	0,216	0,220	-1,82%	Validé
R_{td} caractristique(MN)	0,158	0,161	-1,86%	Validé
R_{td} quasi_permanant(MN)	0,116	0,118	-1,69%	Validé

- Cas 4

TABLEAU 7.33 : Validation cas 4 pour la catégorie 1

	EKFond	Geofond	Ecart	Remarque
$R_s(MN)$	0,257	0,264	-2,65%	Validé
$P_{le}(MPa)$	4,777	4,790	-0,27%	Validé
$D_{ef}(m)$	2,290	2,290	0,00%	Validé
k_p	1,1	1,1	0,00%	Validé
$q_b(MPa)$	5,255	5,260	-0,10%	Validé
$R_b(MN)$	0,660	0,661	-0,15%	Validé
$R_{c;ck;k}(MN)$	0,403	0,408	-1,23%	Validé
R_{cd} fondamental(MN)	0,659	0,665	-0,90%	Validé
R_{cd} accidentel(MN)	0,725	0,732	-0,96%	Validé
R_{cd} sismique(MN)	0,659	0,665	-0,90%	Validé
R_{cd} caractristique(MN)	0,448	0,453	-1,10%	Validé
R_{cd} quasi_permanant(MN)	0,367	0,371	-1,08%	Validé
$R_{t;ck;k}(MN)$	0,117	0,120	-2,50%	Validé
R_{td} fondamental(MN)	0,145	0,149	-2,68%	Validé
R_{td} accidentel(MN)	0,159	0,164	-3,05%	Validé
R_{td} sismique(MN)	0,145	0,149	-2,68%	Validé
R_{td} caractristique(MN)	0,106	0,109	-2,75%	Validé
R_{td} quasi_permanant(MN)	0,078	0,080	-2,50%	Validé

- Cas 5

TABLEAU 7.34 : Validation cas 5 pour la catégorie 1

	EKFond	Geofond	Ecart	Remarque
$R_s(MN)$	0,204	0,211	-3,32%	Validé
$P_{le}(MPa)$	4,777	4,790	-0,27%	Validé
$D_{ef}(m)$	2,290	2,290	0,00%	Validé
k_p	1,1	1,1	0,00%	Validé
$q_b(MPa)$	5,255	5,260	-0,10%	Validé
$R_b(MN)$	0,660	0,661	-0,15%	Validé

$R_{c;ck;k}(MN)$	0,374	0,378	-1,06%	Validé
R_{cd} fondamental(MN)	0,621	0,627	-0,96%	Validé
R_{cd} accidentel(MN)	0,683	0,690	-1,01%	Validé
R_{cd} sismique(MN)	0,621	0,627	-0,96%	Validé
R_{ca} caractristique(MN)	0,416	0,421	-1,19%	Validé
R_{cd} quasi_permanant(MN)	0,340	0,344	-1,16%	Validé
$R_{t;ck;k}(MN)$	0,093	0,096	-3,13%	Validé
R_{td} fondamental(MN)	0,115	0,119	-3,36%	Validé
R_{td} accidentel(MN)	0,126	0,131	-3,82%	Validé
R_{td} sismique(MN)	0,115	0,119	-3,36%	Validé
R_{td} caractristique(MN)	0,084	0,087	-3,45%	Validé
R_{td} quasi_permanant(MN)	0,062	0,064	-3,13%	Validé

- Cas 6

TABLEAU 7.35 : Validation cas 6 pour la catégorie 1

	EKFond	Geofond	Ecart	Remarque
$R_s(MN)$	0,113	0,113	0,00%	Validé
$P_{le}(MPa)$	4,777	4,790	-0,27%	Validé
$D_{ef}(m)$	2,290	2,290	0,00%	Validé
k_p	1,1	1,1	0,00%	Validé
$q_b(MPa)$	5,255	5,260	-0,10%	Validé
$R_b(MN)$	0,660	0,661	-0,15%	Validé
$R_{c;ck;k}(MN)$	0,324	0,324	0,00%	Validé
R_{cd} fondamental(MN)	0,556	0,557	-0,18%	Validé
R_{cd} accidentel(MN)	0,611	0,612	-0,16%	Validé
R_{cd} sismique(MN)	0,556	0,557	-0,18%	Validé
R_{ca} caractristique(MN)	0,360	0,360	0,00%	Validé
R_{cd} quasi_permanant(MN)	0,294	0,295	-0,34%	Validé
$R_{t;ck;k}(MN)$	0,051	0,051	0,00%	Validé
R_{td} fondamental(MN)	0,064	0,063	-1,59%	Validé

R_{td} accidentel(MN)	0,070	0,069	-1,45%	Validé
R_{td} sismique(MN)	0,064	0,063	-1,59%	Validé
R_{td} caractristique(MN)	0,047	0,046	-2,17%	Validé
R_{td} quasi_permanant(MN)	0,034	0,034	0,00%	Validé

7.3.2.2 Catégorie 2

- Cas 1

TABLEAU 7.36 : Validation cas 1 pour la catégorie 2

	EKfond	Geofond	Ecart	Remarque
$R_s(MN)$	0,503	0,515	-2,33%	Validé
$P_{le}(MPa)$	4,777	4,790	-0,27%	Validé
$D_{ef}(m)$	2,290	2,29	0,00%	Validé
k_p	1,1	1,1	0,00%	Validé
$q_b(MPa)$	5,255	5,260	-0,10%	Validé
$R_b(MN)$	0,660	0,661	-0,15%	Validé
$R_{c;ck;k}(MN)$	0,539	0,546	-1,28%	Validé
R_{cd} fondamental(MN)	0,836	0,845	-1,07%	Validé
R_{cd} accidentel(MN)	0,919	0,930	-1,18%	Validé
R_{cd} sismique(MN)	0,836	0,845	-1,07%	Validé
R_{ca} caractristique(MN)	0,599	0,607	-1,32%	Validé
R_{cd} quasi_permanant(MN)	0,490	0,497	-1,41%	Validé
$R_{t;ck;k}(MN)$	0,228	0,234	-2,56%	Validé
R_{td} fondamental(MN)	0,284	0,291	-2,41%	Validé
R_{td} accidentel(MN)	0,311	0,318	-2,20%	Validé
R_{td} sismique(MN)	0,284	0,291	-2,41%	Validé
R_{td} caractristique(MN)	0,208	0,213	-2,35%	Validé
R_{td} quasi_permanant(MN)	0,152	0,156	-2,56%	Validé

- Cas 2

TABLEAU 7.37 : Validation cas 2 pour la catégorie 2

	EKFond	Geofond	Ecart	Remarque
$R_s(MN)$	0,453	0,465	-2,58%	Validé
$P_{le}(MPa)$	4,777	4,79	-0,27%	Validé
$D_{ef}(m)$	2,290	2,29	0,00%	Validé
k_p	1,1	1,1	0,00%	Validé
$q_b(MPa)$	5,255	5,260	-0,10%	Validé
$R_b(MN)$	0,660	0,661	-0,15%	Validé
$R_{c;ck;k}(MN)$	0,512	0,519	-1,35%	Validé
R_{cd} fondamental(MN)	0,800	0,809	-1,11%	Validé
R_{cd} accidentel(MN)	0,880	0,890	-1,12%	Validé
R_{cd} sismique(MN)	0,800	0,809	-1,11%	Validé
R_{cd} caractristique(MN)	0,568	0,576	-1,39%	Validé
R_{cd} quasi_permanant(MN)	0,465	0,471	-1,27%	Validé
$R_{t;ck;k}(MN)$	0,206	0,211	-2,37%	Validé
R_{td} fondamental(MN)	0,256	0,262	-2,29%	Validé
R_{td} accidentel(MN)	0,280	0,287	-2,44%	Validé
R_{td} sismique(MN)	0,256	0,262	-2,29%	Validé
R_{td} caractristique(MN)	0,187	0,192	-2,60%	Validé
R_{td} quasi_permanant(MN)	0,137	0,141	-2,84%	Validé

- Cas 3**

TABLEAU 7.38 : Validation cas 3 pour la catégorie 2

	EKFond	Geofond	Ecart	Remarque
$R_s(MN)$	0,412	0,424	- 2,83%	Validé
$P_{le}(MPa)$	4,777	4,79	-0,27%	Validé
$D_{ef}(m)$	2,290	2,29	0,00%	Validé
k_p	1,1	1,1	0,00%	Validé
$q_b(MPa)$	5,255	5,26	-0,10%	Validé
$R_b(MN)$	0,660	0,661	-0,15%	Validé

$R_{c;ck;k}(MN)$	0,489	0,496	-1,41%	Validé
R_{cd} fondamental(MN)	0,770	0,780	-1,28%	Validé
R_{cd} accidentel(MN)	0,848	0,858	-1,17%	Validé
R_{cd} sismique(MN)	0,770	0,780	-1,28%	Validé
R_{cd} caractristique(MN)	0,543	0,551	-1,45%	Validé
R_{cd} quasi_permanant(MN)	0,444	0,451	-1,55%	Validé
$R_{t;ck;k}(MN)$	0,187	0,193	-3,11%	Validé
R_{td} fondamental(MN)	0,232	0,239	-2,93%	Validé
R_{td} accidentel(MN)	0,255	0,262	-2,67%	Validé
R_{td} sismique(MN)	0,232	0,239	-2,93%	Validé
R_{td} caractristique(MN)	0,170	0,175	-2,86%	Validé
R_{td} quasi_permanant(MN)	0,125	0,128	-2,34%	Validé

- Cas 4

TABLEAU 7.39 : Validation cas 4 pour la catégorie 2

	EKFond	Geofond	Ecart	Remarque
$R_s(MN)$	0,269	0,281	-4,27%	Validé
$P_{le}(MPa)$	4,777	4,790	-0,27%	Validé
$D_{ef}(m)$	2,290	2,290	0,00%	Validé
k_p	1,1	1,1	0,00%	Validé
$q_b(MPa)$	5,255	5,260	-0,10%	Validé
$R_b(MN)$	0,660	0,661	-0,15%	Validé
$R_{c;ck;k}(MN)$	0,410	0,417	-1,68%	Validé
R_{cd} fondamental(MN)	0,668	0,677	-1,33%	Validé
R_{cd} accidentel(MN)	0,735	0,771	-4,67%	Validé
R_{cd} sismique(MN)	0,668	0,677	-1,33%	Validé
R_{cd} caractristique(MN)	0,455	0,463	-1,73%	Validé
R_{cd} quasi_permanant(MN)	0,373	0,379	-1,58%	Validé
$R_{t;ck;k}(MN)$	0,122	0,128	-4,69%	Validé
R_{td} fondamental(MN)	0,152	0,159	-4,40%	Validé

R_{td} accidentel(MN)	0,166	0,174	-4,60%	Validé
R_{td} sismique(MN)	0,152	0,159	-4,40%	Validé
R_{td} caractristique(MN)	0,111	0,116	-4,31%	Validé
R_{td} quasi_permanant(MN)	0,082	0,085	-3,53%	Validé

- Cas 5

TABLEAU 7.40 : Validation cas 5 pour la catégorie 2

	EKFond	Geofond	Ecart	Remarque
$R_s(MN)$	0,209	0,221	-5,43%	Validé
$P_{le}(MPa)$	4,777	4,790	-0,27%	Validé
$D_{ef}(m)$	2,290	2,290	0,00%	Validé
k_p	1,1	1,1	0,00%	Validé
$q_b(MPa)$	5,255	5,260	-0,10%	Validé
$R_b(MN)$	0,660	0,661	-0,15%	Validé
$R_{c;ck;k}(MN)$	0,377	0,384	-1,82%	Validé
R_{cd} fondamental(MN)	0,625	0,634	-1,42%	Validé
R_{cd} accidentel(MN)	0,687	0,697	-1,43%	Validé
R_{cd} sismique(MN)	0,625	0,634	-1,42%	Validé
R_{cd} caractristique(MN)	0,418	0,426	-1,88%	Validé
R_{cd} quasi_permanant(MN)	0,342	0,349	-2,01%	Validé
$R_{t;ck;k}(MN)$	0,095	0,100	-5,00%	Validé
R_{td} fondamental(MN)	0,118	0,125	-5,60%	Validé
R_{td} accidentel(MN)	0,129	0,137	-5,84%	Validé
R_{td} sismique(MN)	0,118	0,125	-5,60%	Validé
R_{td} caractristique(MN)	0,086	0,091	-5,49%	Validé
R_{td} quasi_permanant(MN)	0,063	0,066	-4,55%	Validé

- Cas 6

TABLEAU 7.41 : Validation cas 6 pour la catégorie 2

	EKFond	Geofond	Ecart	Remarque
$R_s(MN)$	0,113	0,113	0,00%	Validé
$P_{le}(MPa)$	4,777	4,790	-0,27%	Validé
$D_{ef}(m)$	2,290	2,290	0,00%	Validé
k_p	1,1	1,1	0,00%	Validé
$q_b(MPa)$	5,255	5,260	-0,10%	Validé
$R_b(MN)$	0,660	0,661	-0,15%	Validé
$R_{c;ck;k}(MN)$	0,324	0,324	0,00%	Validé
$R_{cd} \text{ fondamental}(MN)$	0,556	0,557	-0,18%	Validé
$R_{cd} \text{ accidentel}(MN)$	0,611	0,612	-0,16%	Validé
$R_{cd} \text{ sismique}(MN)$	0,556	0,557	-0,18%	Validé
$R_{cd} \text{ caractristique}(MN)$	0,360	0,360	0,00%	Validé
$R_{cd} \text{ quasi_permanant}(MN)$	0,294	0,295	-0,34%	Validé
$R_{t;ck;k}(MN)$	0,051	0,051	0,00%	Validé
$R_{td} \text{ fondamental}(MN)$	0,064	0,063	-1,59%	Validé
$R_{td} \text{ accidentel}(MN)$	0,070	0,069	-1,45%	Validé
$R_{td} \text{ sismique}(MN)$	0,064	0,063	-1,59%	Validé
$R_{td} \text{ caractristique}(MN)$	0,047	0,046	-2,17%	Validé
$R_{td} \text{ quasi_permanant}(MN)$	0,034	0,034	0,00%	Validé

7.3.2.3 Catégorie 6

- Cas 1

TABLEAU 7.42 : Validation cas 1 pour la catégorie 6

	EKFond	Geofond	Ecart	Remarque
$R_s(MN)$	0,720	0,722	-0,28%	Validé
$P_{le}(MPa)$	4,777	4,790	-0,27%	Validé
$D_{ef}(m)$	2,290	2,29	0,00%	Validé
k_p	1,65	1,65	0,00%	Validé
$q_b(MPa)$	5,255	5,260	-0,10%	Validé

$R_b(MN)$	0,991	0,992	-0,10%	Validé
$R_{c;ck;k}(MN)$	0,790	0,792	-0,25%	Validé
R_{cd} fondamental(MN)	1,229	1,230	-0,08%	Validé
R_{cd} accidentel(MN)	1,350	1,360	-0,74%	Validé
R_{cd} sismique(MN)	1,229	1,230	-0,08%	Validé
R_{cd} caractristique(MN)	0,878	0,880	-0,23%	Validé
R_{cd} quasi_permanant(MN)	0,718	0,720	-0,28%	Validé
$R_{t;ck;k}(MN)$	0,327	0,328	-0,30%	Validé
R_{td} fondamental(MN)	0,407	0,408	-0,25%	Validé
R_{td} accidentel(MN)	0,445	0,446	-0,22%	Validé
R_{td} sismique(MN)	0,407	0,408	-0,25%	Validé
R_{td} caractristique(MN)	0,298	0,298	0,00%	Validé
R_{td} quasi_permanant(MN)	0,218	0,219	-0,46%	Validé

- Cas 2

TABLEAU 7.43 : Validation cas 2 pour la catégorie 6

	EKfond	Geofond	Ecart	Remarque
$R_s(MN)$	0,660	0,662	-0,30%	Validé
$P_{le}(MPa)$	4,777	4,79	-0,27%	Validé
$D_{ef}(m)$	2,290	2,29	0,00%	Validé
k_p	1,65	1,65	0,00%	Validé
$q_b(MPa)$	5,255	5,260	-0,10%	Validé
$R_b(MN)$	0,991	0,992	-0,10%	Validé
$R_{c;ck;k}(MN)$	0,757	0,758	-0,13%	Validé
R_{cd} fondamental(MN)	1,186	1,190	-0,34%	Validé
R_{cd} accidentel(MN)	1,305	1,310	-0,38%	Validé
R_{cd} sismique(MN)	1,186	1,19	-0,34%	Validé
R_{cd} caractristique(MN)	0,841	0,843	-0,24%	Validé
R_{cd} quasi_permanant(MN)	0,688	0,690	-0,29%	Validé
$R_{t;ck;k}(MN)$	0,300	0,301	-0,33%	Validé

R_{td} fondamental(MN)	0,373	0,374	-0,27%	Validé
R_{td} accidentel(MN)	0,408	0,409	-0,24%	Validé
R_{td} sismique(MN)	0,373	0,374	-0,27%	Validé
R_{td} caractristique(MN)	0,273	0,274	-0,36%	Validé
R_{td} quasi_permanant(MN)	0,200	0,201	-0,50%	Validé

• Cas 3

TABLEAU 7.44 : Validation cas 3 pour la catégorie 6

	EKFond	Geofond	Ecart	Remarque
$R_s(MN)$	0,611	0,613	-0,33%	Validé
$P_{le}(MPa)$	4,777	4,790	-0,27%	Validé
$D_{ef}(m)$	2,290	2,290	0,00%	Validé
k_p	1,65	1,65	0,00%	Validé
$q_b(MPa)$	5,255	5,260	-0,10%	Validé
$R_b(MN)$	0,991	0,992	-0,10%	Validé
$R_{c;ck;k}(MN)$	0,730	0,731	-0,14%	Validé
R_{cd} fondamental(MN)	1,151	1,151	0,00%	Validé
R_{cd} accidentel(MN)	1,266	1,270	-0,31%	Validé
R_{cd} sismique(MN)	1,151	1,151	0,00%	Validé
R_{ca} caractristique(MN)	0,811	0,813	-0,25%	Validé
R_{cd} quasi_permanant(MN)	0,661	0,665	-0,60%	Validé
$R_{t;ck;k}(MN)$	0,278	0,279	-0,36%	Validé
R_{td} fondamental(MN)	0,345	0,346	-0,29%	Validé
R_{td} accidentel(MN)	0,378	0,379	-0,26%	Validé
R_{td} sismique(MN)	0,345	0,346	-0,29%	Validé
R_{td} caractristique(MN)	0,252	0,253	-0,40%	Validé
R_{td} quasi_permanant(MN)	0,185	0,186	-0,54%	Validé

• Cas 4

TABLEAU 7.45 : Validation cas 4 pour la catégorie 6

	EKFond	Geofond	Ecart	Remarque
$R_s(MN)$	0,440	0,442	-0,45%	Validé
$P_{le}(MPa)$	4,777	4,790	-0,27%	Validé
$D_{ef}(m)$	2,290	2,290	0,00%	Validé
k_p	1,65	1,65	0,00%	Validé
$q_b(MPa)$	5,255	5,260	-0,10%	Validé
$R_b(MN)$	0,991	0,992	-0,10%	Validé
$R_{c;ck;k}(MN)$	0,635	0,636	-0,16%	Validé
R_{cd} fondamental(MN)	1,028	1,030	-0,19%	Validé
R_{cd} accidentel(MN)	1,131	1,132	-0,09%	Validé
R_{cd} sismique(MN)	1,028	1,030	-0,19%	Validé
R_{cd} caractristique(MN)	0,705	0,707	-0,28%	Validé
R_{cd} quasi_permanant(MN)	0,577	0,579	-0,35%	Validé
$R_{t;ck;k}(MN)$	0,200	0,201	-0,50%	Validé
R_{td} fondamental(MN)	0,248	0,249	-0,40%	Validé
R_{td} accidentel(MN)	0,272	0,273	-0,37%	Validé
R_{td} sismique(MN)	0,248	0,249	-0,40%	Validé
R_{td} caractristique(MN)	0,182	0,182	0,00%	Validé
R_{td} quasi_permanant(MN)	0,133	0,134	-0,75%	Validé

- Cas 5

TABLEAU 7.46 : Validation cas 5 pour la catégorie 6

	EKFond	Geofond	Ecart	Remarque
$R_s(MN)$	0,368	0,369	-0,27%	Validé
$P_{le}(MPa)$	4,777	4,790	-0,27%	Validé
$D_{ef}(m)$	2,290	2,290	0,00%	Validé
k_p	1,65	1,65	0,00%	Validé
$q_b(MPa)$	5,255	5,260	-0,10%	Validé
$R_b(MN)$	0,991	0,992	-0,10%	Validé

$R_{c;ck;k}(MN)$	0,595	0,597	-0,34%	Validé
R_{cd} fondamental(MN)	0,976	0,978	-0,20%	Validé
R_{cd} accidentel(MN)	1,074	1,080	-0,56%	Validé
R_{cd} sismique(MN)	0,976	0,978	-0,20%	Validé
R_{ca} caractristique(MN)	0,661	0,663	-0,30%	Validé
R_{cd} quasi_permanant(MN)	0,541	0,542	-0,18%	Validé
$R_{t;ck;k}(MN)$	0,167	0,168	-0,60%	Validé
R_{td} fondamental(MN)	0,208	0,209	-0,48%	Validé
R_{td} accidentel(MN)	0,227	0,228	-0,44%	Validé
R_{td} sismique(MN)	0,208	0,209	-0,48%	Validé
R_{td} caractristique(MN)	0,152	0,153	-0,65%	Validé
R_{td} quasi_permanant(MN)	0,111	0,112	-0,89%	Validé

- Cas 6

TABLEAU 7.47 : Validation cas 6 pour la catégorie 6

	EKFond	Geofond	Ecart	Remarque
$R_s(MN)$	0,214	0,214	0,00%	Validé
$P_{le}(MPa)$	4,777	4,790	-0,27%	Validé
$D_{ef}(m)$	2,290	2,290	0,00%	Validé
k_p	1,65	1,65	0,00%	Validé
$q_b(MPa)$	5,255	5,260	-0,10%	Validé
$R_b(MN)$	0,991	0,992	-0,10%	Validé
$R_{c;ck;k}(MN)$	0,510	0,510	0,00%	Validé
R_{cd} fondamental(MN)	0,865	0,866	-0,12%	Validé
R_{cd} accidentel(MN)	0,952	0,953	-0,10%	Validé
R_{cd} sismique(MN)	0,865	0,866	-0,12%	Validé
R_{ca} caractristique(MN)	0,566	0,567	-0,18%	Validé
R_{cd} quasi_permanant(MN)	0,463	0,464	-0,22%	Validé
$R_{t;ck;k}(MN)$	0,097	0,097	0,00%	Validé
R_{td} fondamental(MN)	0,121	0,121	0,00%	Validé

R_{td} accidentel(MN)	0,132	0,132	0,00%	Validé
R_{td} sismique(MN)	0,121	0,121	0,00%	Validé
R_{td} caractristique(MN)	0,088	0,088	0,00%	Validé
R_{td} quasi_permanant(MN)	0,065	0,0647	-0,46%	Validé

7.3.2.4 Vérification du béton

TABLEAU 7.48 : Validation de la vérification du béton

		EKFond	Geofond	Ecart	Remarque
Catégorie 1 et 2	$\sigma_{moy,els}(MPA)$	6,02	6,02	0%	Validé
	$\sigma_{max,els}(MPA)$	12,04	12	-0,33%	Validé
Catégorie 6	$\sigma_{moy,els}(MPA)$	5,79	5,8	-0,17%	Validé
	$\sigma_{max,els}(MPA)$	11,59	11,6	-0,09%	Validé

7.4 Annexe 4 : EKfielle

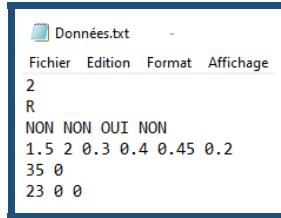
7.4.1 Exemple de calcul

On cherche à vérifier la stabilité d'une fondation superficielle rectangulaire et sa portance par la méthode pressiométrique ainsi que calculer le tassement et le ferraillage nécessaire.

La géométrie de la semelle, (B,L,D,b,l,h), sont respectivement (1.5m, 2m, 0.45m, 0.4m, 0.45m, 0.2m).

L'utilisateur introduit les fichiers suivants :

- *Données* :



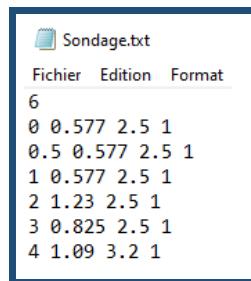
```

Données.txt
Fichier Edition Format Affichage
2
R
NON NON OUI NON
1.5 2 0.3 0.4 0.45 0.2
35 0
23 0 0

```

FIGURE 7.32 : Fichier *Données* pour le cas de l'exemple étudié

- *Sondage* :



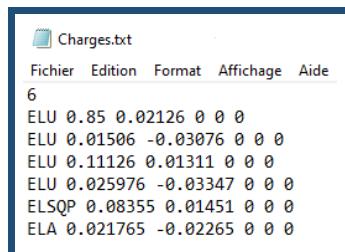
```

Sondage.txt
Fichier Edition Format
6
0 0.577 2.5 1
0.5 0.577 2.5 1
1 0.577 2.5 1
2 1.23 2.5 1
3 0.825 2.5 1
4 1.09 3.2 1

```

FIGURE 7.33 : Fichier *Sondage* pour le cas de l'exemple étudié

- *Charges* :



```

Charges.txt
Fichier Edition Format Affichage Aide
6
ELU 0.85 0.02126 0 0 0
ELU 0.01506 -0.03076 0 0 0
ELU 0.11126 0.01311 0 0 0
ELU 0.025976 -0.03347 0 0 0
ELSQP 0.08355 0.01451 0 0 0
ELA 0.021765 -0.02265 0 0 0

```

FIGURE 7.34 : Fichier *Charges* pour le cas de l'exemple étudié

- *Tassement* :

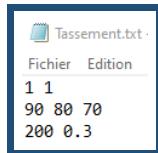


FIGURE 7.35 : Fichier *Tassement* pour le cas de l'exemple étudié

- *Séisme* :

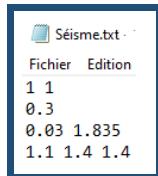


FIGURE 7.36 : Fichier *Séisme* pour le cas de l'exemple étudié

- *Ferraillage* :



FIGURE 7.37 : Fichier *Ferraillage* pour le cas de l'exemple étudié

Le fichier « Résultats de calcul.txt » est composé de plusieurs partie.

La première partie est celle de la récapitulation des données :

Résultats de calcul.txt								
Fichier Edition Format Affichage Aide								
-----EKfielle_v1.0-----								
-----Calcul des fondations superficielles-----								
-----Suivant la NF P94-261 et NF EN 1998-5-----								
-----Méthode Pressionnétrique-----								
 Caractéristiques géométriques:								
Semelle rectangulaire								
B: 1.5 m								
L: 2.0 m								
D: 0.45 m								
A: 3.0 m ²								
d: NA								
 Caractéristiques du sol:								
Angle de frottement interne: 35.0°								
Inclinaison de la semelle: 0.0°								
Poids volumique déjaugé: 23.0 kN/m ³								
Cohésion: 0.0 MPa								
Contrainte verticale: 0.0 MPa								
 Charges:								
Cas	Etat limite	V(MN)	H_B(MN)	H_L(MN)	H(MN)	teta(°)	M_B(MNm)	M_L(MNm)
1	ELU	0.850	0.021	0.000	0.021	NA	0.000	0.000
2	ELU	0.015	-0.031	0.000	0.031	NA	0.000	0.000
3	ELU	0.111	0.013	0.000	0.013	NA	0.000	0.000
4	ELU	0.026	-0.033	0.000	0.033	NA	0.000	0.000
5	ELSQP	0.084	0.015	0.000	0.015	NA	0.000	0.000
6	ELA	0.022	-0.023	0.000	0.023	NA	0.000	0.000

FIGURE 7.38 : Fichier « *Résultats de calcul* » partie des données pour le cas de l'exemple étudié

La deuxième partie est celle des résultats de calcul :

Résultats de calculs:												
Cas	eB(m)	el(m)	B'(m)	L'(m)	A'(m²)	hr(m)	De(m)	kp	Ple(MPa)	i_delta	i_beta	qnet(MPa)
1	0.00	0.00	1.50	2.00	3.00	2.25	0.35	0.88	0.743	0.944	1.000	0.617
2	0.00	0.00	1.50	2.00	3.00	2.25	0.35	0.88	0.743	0.017	1.000	0.011
3	0.00	0.00	1.50	2.00	3.00	2.25	0.35	0.88	0.743	0.751	1.000	0.491
4	0.00	0.00	1.50	2.00	3.00	2.25	0.35	0.88	0.743	0.857	1.000	0.024
5	0.00	0.00	1.50	2.00	3.00	2.25	0.35	0.88	0.743	0.648	1.000	0.424
6	0.00	0.00	1.50	2.00	3.00	2.25	0.35	0.88	0.743	0.849	1.000	0.032

Vérifications de la stabilité suivant la NF P94-261:											
Cas	Vrd(MN)	Vérification	Hrd(MN)	Vérification	Excentricité	Soulèvement	Résultat				
1	1.102	OUI	0.541	OUI	OUI	NA	OUT				
2	0.020	OUI	0.010	NON	OUI	NA	NON				
3	0.877	OUI	0.071	OUI	OUI	NA	OUI				
4	0.043	OUI	0.017	NON	OUI	NA	NON				
5	0.461	OUI	NA	NA	OUI	NA	OUI				
6	0.058	OUI	0.014	NON	OUI	NA	NON				

FIGURE 7.39 : Fichier « *Résultats de calcul* » partie des calculs pour le cas de l'exemple étudié

Une troisième partie qui représente le calcul du tassement :

Calcul du tassement suivant la méthode pressiométrique de la NF P94-261:											
Cas	Sc(mm)	Sd(mm)	Sf(mm)								
5	0.036	0.085	0.120								

Calcul du tassement suivant le modèle élastique:											
Cas	Sf(mm)										
5	0.096										

FIGURE 7.40 : Fichier « *Résultats de calcul* » partie des tassements pour le cas de l'exemple étudié

La dernière partie présente le ferraillage des la semelle :

Calcul de ferraillage selon EC2: [section_B/section_L]											
Cas	Méthodes des bieilles (cm²/m)	Méthodes de moment de flexion (cm²/m)	Section minimale (cm²/m)	Section retenue (cm²/m)							
1	[5.883/9.775]	[4.561/4.595]	[6.025/6.025]	[6.025/9.775]							
2	[0.104/0.173]	[0.080/0.080]	[6.025/6.025]	[6.025/6.025]							
3	[0.770/1.279]	[0.592/0.593]	[6.025/6.025]	[6.025/6.025]							
4	[0.180/0.299]	[0.138/0.138]	[6.025/6.025]	[6.025/6.025]							
5	[0.503/0.835]	[0.386/0.387]	[6.025/6.025]	[6.025/6.025]							
6	[0.131/0.218]	[0.101/0.101]	[6.025/6.025]	[6.025/6.025]							

FIGURE 7.41 : Fichier « *Résultats de calcul* » partie des ferraillages pour le cas de l'exemple étudié

