

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**



UNIVERSITE MOULOU MAMMERI DE TIZI-OUZOU

FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

LABORATOIRE : LAMOMS



MEMOIRE DE MASTER RECHERCHE

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures et matériaux

Thème

***Développement d'une application de
simulation et de modélisation de poutres en
béton confiné***

Promoteur :

Pr. K. AIT TAHAR

Réalisé par :

SADOUK Sofiane

Soutenu - 2012-

DEDICACES

*Je dédie ce travail aux plus chers à mon cœur : mes enfants **Asmaa** et **Mohamed** , ma femme Djamila ,mes parents Belkaceme et Ghenima et mes frères et sœurs Yacine, Safia, Ghafour et Sarah.*

REMERCIEMENTS

Je remercie mon dieu le tout puissant de m'avoir accordé le courage et la foi pour accomplir ce travail.

*Je tiens à exprimer mes remerciements respectueux à mon professeur et encadreur Monsieur **AIT TAHAR KAMAL**, Professeur à UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU, pour l'intérêt bienveillant qu'il a accordé à ce travail, pour sa disponibilité permanente et ses orientations, ainsi que d'avoir mis à ma disposition les moyens de calcul qui m'ont permis de mener à bien cette recherche.*

*Je voudrais exprimer ma profonde gratitude au Dr **MERAKEB SEDDIK**, qui a bien voulu assurer le suivi de ce travail et qui a eu l'obligeance de mettre à ma disposition son savoir faire.*

*Je remercie ardemment Mr **BOUAMRA YUCEF** pour sa disponibilité et son aide au cours de la réalisation de ce travail.*

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner ce travail et de l'enrichir par leurs propositions.

J'exprime affectueusement mes remerciements pour mes collègues pour leur soutien.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MATERIAUX	2
I-1 PREAMBULE:	2
I-1 BETON ARME:	2
I-1.1 Principe de fonctionnement:	3
I-2 LE BÉTON:.....	4
I-2.1 Historique:.....	5
I-2.2 Constituants du béton :.....	7
I-2.3 Propriétés mécaniques :	9
I-3 ACIER:.....	10
I-3.1 Différents types d'armatures	10
I-3.2 Désignation des armatures	11
I-3.3 Quelques définitions	11
I-3.4 Caractéristiques des aciers.....	13
I-3.5 Liaison acier béton	15
I-3.6 Propriétés pour le dimensionnement.....	15
CHAPITRE II : TECHNIQUES DE CONFINEMENT DES STRUCTURES.....	20
II-1 INTRODUCTION:.....	20
II-2 COMPORTEMENT DU BETON EN COMPRESSION :	20
II-3 COMPORTEMENT DU BETON CONFINE:	22
II-4 MECANISME DE CONFINEMENT :	23
II-5 TECHNIQUE DE CONFINEMENT PAR PRECONTRAINTE INDUITE -TECHNIQUE DE AIT TAHAR K : ..	24
II-5.1 La précontrainte induite :.....	24
II-5.2 Principe de confinement de béton par des spirales	25
II-6 MODELISATION DU COMPORTEMENT A LA COMPRESSION D'UN BETON CONFINE :.....	25
II-7 PRINCIPE DE CONFINEMENT DU BETON PAR DES SPIRALES :	25
II-7.1 Calcul de F :	28
II-7.2 Calcul de F_0 :	28
II-7.3 Calcul de et analyse de la fonction $f(\theta)$:.....	31
II-7.4 Calcul de θ_1 :.....	31
II-7.5 Détermination du point d'application de l'effort de confinement :.....	31



CHAPITRE III-DEVELOPPEMENT D'UNE APPLICATION DE SIMULATION	34
III-1 PRESENTATION:	34
III-2 POSITION DU PROBLEME MECANIQUE:	34
III-3 OUTILS DE PROGRAMMATION ET OPTIONS CHOISIES:	35
III-3.1 Exigences sur le processeur et orientation de choix :	35
III-3.2 Exigences sur le préprocesseur et orientation de choix :	37
III-3.3 Choix du langage de programmation:	39
III-3.4 Comportement global du programme :	42
III-3.5 Les dictionnaires sur autocad :	42
III-3.6 Les itérateurs sur autocad :	43
III-4 PRINCIPALES ROUTINES DE L'APPLICATION :	43
III-4.1 La Routine rebarre :	44
III-4.2 La Routine Ajout_cerce_conf:	46
III-4.3 La Routine 3D_rebarre :	49
III-4.4 La Routine Ajout_plaques_de confinement:	52
III-4.5 La Routine Calc_dans_Castem:	53
III-5 LA CONVERSION D'INFORMATION AUTOCAD VERS CASTEM:	53
III-5.1 Création de cavités dans castem :	54
III-5.2 Extrusion de coupes transversales du composite béton renfort :	55
III-5.3 Extrusion de demi-coupes transversales du composite béton renfort :	55
III-5.4 Calcul mathématique des coupes pour création du maillage :	55
III-5.5 La Procédure scan_solide_3D :	56
III-5.6 Autres utilisation du module convertisseur :	58
III-6 LE MODEL ET SON ANALYSE DANS CAST3M:	58
III-6.1 Options générales :	60
III-6.2 Opérateurs utilisée pour le maillage de surface :	61
III-6.3 Opérateurs utilisée pour le maillage volumique :	62
III-6.4 Opérateurs auxiliaires :	62
III-6.5 Opérateurs géométriques additionnel créés et utilisés:	62
III-6.6 Opérateurs utilisée pour les paramètres mécaniques:	70
III-6.7 Opérateurs utilisée pour le poste processeur:	72
Conclusion du chapitre	73

CHAPITRE IV : APPLICATION ET INTERPRETATION	74
INTRODUCTION:.....	74
IV-1 COMPOTEMENT GLOBAL DE LA STRUCTURE ET INFLUENCE DE VARIATION DES PARAMETRES GEOMETRIQUES SUR LE CONFINEMENT :	74
IV-1.1 Déplacement seuil:.....	75
IV-2 APPLICATION SUR L'INFLUENCE DE VARIATION DE LA LONGUEUR DU CERCE :	76
IV-3 APPLICATION SUR L'INFLUENCE DE VARIATION DE LA LARGEUEUR DU CERCE :.....	77
IV-4 ANALYSE ET SYNTHESE :.....	78
IV-4.1 L'incrément de rigidité :.....	78
IV-4.2 L'incrément de rigidité dans le cas de variation de longueur du cerce:	78
IV-4.3 L'incrément de rigidité dans le cas de variation de largeur du cerce:	79
IV-4.4 Utilisation des algorithmes génétiques :.....	79
IV-4.5 Application des AG pour prédire la variation de L'incrément de rigidité en fonction de la largeur du cerce:	81
IV-4.6 Application des AG pour prédire la variation de L'incrément de rigidité en fonction de la longueur du cerce:	81
IV-4.7 Variation de la force en fonction de la longueur et la hauteur:	82
Conclusion du chapitre :	85
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES :.....	86
Références Bibliographiques :	87
annexes.....	88



LISTE DES FIGURES

Figure I- 1:Armatures métalliques de renforcement du béton	3
Figure I- 3: Schémas des armatures à verrous.....	14
Figure I- 4:Schéma des armatures à empreintes	14
Figure I- 5: diagramme contraintes déformations pour l'acier.....	18
Figure II- 1 : Comportement du béton en compression uni-axiale.....	21
Figure II- 2:Courbes contrainte-déformation pour des bétons de différentes résistances.....	22
Figure II- 3:Courbes contraintes déformations d'un béton confiné et non confiné.....	23
Figure II- 4:diagramme des contraintes déformations dans le cas de béton confiné.	24
Figure II- 6:poutre soumise à une pécontainte induite	25
Figure II- 7:diagramme des déformations Béton armé	26
Figure II- 8:Béton confiné avce spirale.....	26
Figure II- 9: analogie du confinement avec Spirales	27
Figure II- 10: schéma de poutre confinée avec spirales	27
Figure II- 11:schéma de répartition de l'effort dans la spirale	28
Figure II- 12:Calcul infinitesimal de l'effort.....	29
Figure II- 13:efforts dans une barre courbe.....	29
Figure II- 14:projection des efforts dans une barre courbe.....	30
Figure II- 15:fonction de répartition de l'effort de confinement.....	32
Figure III- 1 : schémas de principe du dispositif expérimental	34
Figure III- 2 : schémas de la géométrie du dispositif expérimental.....	35
Figure III- 3 : model Activex–Object Autocad	41
Figure III- 4 : résultat de la routine rebarre	45
Figure III- 5 : résultat de la routine Ajout_cerce_conf.....	46
Figure III- 6 : débogage de la routine Ajout_cerce_conf	47
Figure III- 7 :illustration du Calcul du Bulge	48
Figure III- 8 : résultat de la routine 3D_rebarre.....	49
Figure III- 9 : différence du pas de maillage de en déroulant la routine 3D_rebarre	51
Figure III- 10 : ajout de plaques de confinement Ajout_plaques_confin.....	52
Figure III- 11 : Exécution de Castem	53
Figure III- 12 : problème de convexité de Castem	55
Figure III- 13 : différentes de coupes possibles selon les cas.....	56
Figure III- 14 : procédure de travail du convertisseur.....	57
Figure III- 15 : illustration du <i>handyscan</i>	58
Figure III- 16 : succession des taches de Castem	59
Figure III- 17 : Extrusion	62
Figure III- 18 : schéma de coupe castem.....	63
Figure III- 19 : partition d'une coupe pour Castem.....	65



Figure IV- 1 : schémas de base des paramètres variables.	75
Figure IV- 2:graphiques combiné des cas calculés.....	75
Figure IV- 3 : variation remarquées de l'incrément en fonction de la longueur	78
Figure IV- 4: variation remarquées de l'incrément en fonction de la largeur	79
Figure IV- 5: Graphiques de Calcul $F(L)$	83
Figure IV- 6: Graphiques de Calcul $F(H)$	84

Résumé

Le présent travail consiste à développer un programme de simulation et de calcul des poutres en béton confiné par des armatures de résistance façonnées en spirales, de l'appliquer sur un grand nombre de spécimens prismatiques en facilitant la saisie des paramètres géométriques et mécaniques. Cette technique est basée sur le principe de la précontrainte induite. Cette technique est développée par le prof. Ait tahar K. dans le cadre de ses projets de recherche.

Une application de simulation du comportement sous chargement de flexion, le résonnement aboutissant et l'explicitation des contraintes (logiciels, matériel, ressources...) rencontrées, sont développés dans cette étude.

Plusieurs cas de figures sont introduits dans l'application et une analyse critique des résultats est effectuée avec une confrontation aux cas expérimentaux obtenus aux laboratoires. Enfin, une étude de corrélation globale entre les paramètres introduits est réalisée.

Abstract

This work consists in developing a calculation and simulation program of the concrete beams confined by spirals steel reinforcements, to apply it to a great number by facilitating the seizure of the geometrical and mechanical parameters. This technique is based on the principle of induced prestressing. This technique is developed by Prof Ait tahar K within the framework of its research projects.

An application of simulation of the behaviour under flexural loading, development succeeding and the clarification of the strengths (software, hardware, resources...) met, are developed in this study.

Several cases of figures are introduced into the application and a critical analysis of the results is carried out with a confrontation with the experimental results, obtained at the laboratories. Lastly, a study of total correlation between the introduced parameters is carried out.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE :

En génie civil, les ouvrages sont conçus et réalisés pour une durée de vie et résister à des sollicitations déterminés. Les éléments de structure sont ainsi sensés supporter les sollicitations engendrés par le chargement et se dégrader selon le calendrier de dégradation prévu.

Faire travailler ces éléments de manière optimisée est l'objectif de toute philosophie de dimensionnement et de toute idée géniale de nos jours. Ainsi est apparue en plus des concepts ordinaires du béton armé ; la précontrainte, les matériaux composites...

Depuis quelques années une nouvelle orientation de détailler les approches rudimentaires, de les développer au sein de ce qui est connu existent déjà, parmi celles-ci apparait le confinement du béton.

Le présent travail consiste à développer un programme de simulation et de calcul des poutres en béton confiné par des spirales, de l'appliquer sur un grand nombre en facilitant la saisie des paramètres géométriques et mécaniques.

Le mémoire est structuré comme suit :

- ❖ Chapitre I –« Synthèse bibliographique sur le matériau béton » : dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse bibliographique sur les caractéristiques et les comportements des deux matériaux utilisés dans cette étude, à savoir le béton armé ainsi que le domaine d'application de ce dernier.
- ❖ chapitre II –« Techniques de confinement des structures » : dans ce chapitre est présentée la technique de confinement des poutres par précontrainte induite. Et les principes mécaniques qui pilotent cette technique.
- ❖ Chapitre III –« Développement d'une application de simulation » : dans ce chapitre est développé une application de simulation du comportement sous chargement de flexion, le résonnement aboutissant et l'explicitation des contraintes (logiciels, matériel, ressources...) rencontrées.
- ❖ chapitre IV-« Application et interprétation » : des cas de figures sont introduits dans l'application et une analyse critique des résultats est effectuée avec une confrontation aux cas expérimentaux obtenus aux laboratoires et une projection d'obtention de corrélation globale entre les paramètres introduits.

Une conclusion générale et des perspectives terminent notre travail.

Chapitre I :

Synthèse bibliographique sur les matériaux

CHAPITRE I. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MATERIAUX

I-1 PREAMBULE:

Le béton armé est utilisé pour la construction de bâtiments, d'usines, de couvertures en coques minces, de réservoirs et de silos de petite capacité, de ponts de petite portée, de routes, d'ouvrages de fondation, d'ouvrages portuaires.

Le béton est un matériau capable de supporter des efforts de compression importants (15 à 60 MPa) alors que sa résistance aux efforts de traction est très faible (de l'ordre du dixième de sa résistance à la compression). C'est donc pour pallier cette insuffisance qu'est née l'idée de placer, dans les zones soumises à des efforts de traction, des barres d'acier (armatures) qui elles, sont résistantes aussi bien en compression qu'en traction. Le matériau résultant de l'association du béton et de l'acier est appelé « béton armé ».

Dans une structure en béton armé, les aciers principaux sont positionnés dans les parties tendues du béton pour compenser la mauvaise résistance du béton en traction. Pour une dalle en béton armé par exemple, on place les armatures principales en partie basse des travées et en partie haute au niveau des appuis. Les premiers ouvrages en béton armé utilisaient des barres lisses en acier doux, par la suite les barres furent constituées d'acier haute adhérence comprenant des aspérités et ayant une meilleure résistance. Les premières définitions des principes de calculs ont été faites à la suite des travaux de la commission du ciment armé qui ont abouti à la rédaction de la Circulaire du 20 octobre 1906 concernant les instructions relatives à l'emploi du béton armé. Une commission prussienne définit les premières instructions sur le béton armé le 16 avril 1904, modifiées par le Ministre des Travaux publics de Prusse par la circulaire du 24 mai 1907.

I-1 BETON ARME:

Le béton armé est un matériau composite constitué de béton et de barres d'acier qui allie la résistance à la compression du béton, à la résistance à la traction de l'acier. Il est utilisé comme matériau de construction, notamment pour le génie civil.



Figure I- 1: Armatures métalliques de renforcement du béton

I-1.1 Principe de fonctionnement:

Une pièce, telle qu'une poutre, reposant sur des appuis à ses extrémités est l'objet de sollicitations de flexion et d'effort tranchant quand elle est soumise à l'action de charges. Les moments de flexion sont équilibrés dans une section donnée de la pièce par des contraintes normales s dont la valeur varie linéairement sur la hauteur de la section. Elles sont maximales sur les fibres extrêmes; ce sont des contraintes de compression s_c , dans la partie supérieure de la section, des contraintes de traction s_t , dans la partie inférieure. Si la contrainte de traction atteint la résistance à la traction du béton, celui-ci se rompt. Cette rupture est évitée en disposant des barres d'acier ou armatures dans la zone où les contraintes de traction sont maximales. Le moment est alors équilibré, d'une part, par les contraintes de compression qui se développent dans la partie supérieure de la section et, d'autre part, par l'effort de traction qui s'exerce alors dans les armatures longitudinales. De même, les efforts tranchants sont à l'origine de contraintes de cisaillement réparties sur la hauteur de la section. Celles-ci sont reprises par des armatures transversales, cadres et étriers, en général perpendiculaires aux armatures longitudinales.

La transmission des efforts du béton aux armatures, ou inversement, est rendue possible par le phénomène dit d'adhérence qui se manifeste entre ces matériaux. L'adhérence résulte en fait d'un processus de frottement entre l'acier et le béton. Elle est améliorée lorsque les barres d'acier constituant les armatures comportent des saillies sur leur surface, telles les barres H.A. (à haute adhérence) qui sont couramment utilisées, les barres lisses n'étant employées que lorsqu'il est nécessaire de procéder à des pliages et des dépliages successifs. La limite élastique de l'acier constituant ces barres varie de 400 à 500 MPa. Leur diamètre est normalisé dans une gamme qui s'étend de 5 à 40 mm.

Le béton armé est constitué par du béton et des armatures en acier judicieusement disposées. Son fonctionnement normal suppose une fine fissuration des zones tendues, qui ne porte pas préjudice à sa durabilité si l'ouverture des fissures demeure inférieure à 0,1 mm en environnement agressif et à 0,3 mm en milieu non agressif. De telles ouvertures évitent toute corrosion des armatures en acier, le béton empêchant la pénétration d'eau vers les aciers et constituant un milieu basique qui protège les aciers par passivation. Il est à noter que le composite béton-acier ne présente un comportement satisfaisant que parce qu'il se trouve que béton et acier ont environ le même coefficient de dilatation thermique.

I-2 LE BÉTON:

Le béton est aujourd'hui le matériau de construction par excellence. Environ 4 milliards de mètres cubes de béton sont utilisés tous les ans de par le monde pour la construction d'ouvrages de toutes natures, notamment de bâtiments, d'immeubles d'habitation, de ponts, de routes, de tunnels, d'aéroports, de barrages, de ports, de centrales thermiques et nucléaires et de plates-formes offshore.

Ce choix universel est fondé sur des critères techniques et économiques. La résistance mécanique et la durabilité, c'est-à-dire le bon comportement dans le temps face aux actions des charges et aux agressions physico-chimiques de l'environnement, constituent les principaux critères techniques. Les critères économiques sont évalués à partir de la disponibilité et du coût des matières premières, de la facilité d'emploi et du prix de revient du matériau en œuvre. Le béton répond parfaitement à ces conditions de

choix:

il est constitué de matériaux naturels primaires largement distribués à la surface de la terre;

sa mise en œuvre est aisée et ne nécessite que l'utilisation d'une main-d'œuvre rapidement formée;

il permet une adaptation facile aux formes les plus variées puisque, mis en place dans des moules ou coffrages, il en épouse les volumes, aussi complexes soient-ils, permettant ainsi les plus grandes audaces architecturales;

ses capacités de résistance dépassent celles des meilleures roches naturelles;

sa durabilité est plus que séculaire lorsqu'il est correctement formulé et mis en œuvre; il résiste bien aux effets d'environnements corrosifs et, en particulier, à l'action de l'eau de mer; il offre une bonne tenue au feu, garantie de sécurité vis-à-vis des incendies;

son prix de revient, enfin, fait du béton le matériau irremplaçable dans le domaine de la construction

Le béton est un composite hétérogène qui résulte du mélange intime de ciment, de granulats, d'eau et de faibles quantités d'adjuvants. Ces constituants sont dosés de manière à obtenir, après durcissement, un produit solide dont les propriétés mécaniques peuvent être très supérieures à celles des roches naturelles. Dans la mesure où le ciment est un liant hydraulique fabriqué essentiellement à partir de minéraux naturels, le béton peut être considéré comme une roche artificielle.

I-2.1 Historique:

Comme les roches naturelles, le béton possède une grande résistance à la compression et une faible résistance à la traction. C'est pourquoi son utilisation comme matériau de construction, qui remonte aux Romains, ne s'est véritablement développée qu'avec l'invention du béton armé. Dans ce dernier, des armatures, c'est-à-dire des barres en acier (initialement en fer), pallient son insuffisante résistance à la traction.

L'invention du béton armé est généralement attribuée à Joseph Lambot, qui, en 1848, fit flotter une barque en ciment armé, et à Joseph Monier, qui construisit indépendamment, grâce à ce matériau, des bacs à fleurs en 1849. L'emploi du béton armé

dans les structures s'étend dès lors rapidement en France sous l'impulsion de Joseph Monier, mais aussi de Coignet, de François Hennebique et d'Armand Gabriel Considère. Dès 1906, une circulaire ministérielle fixe des «Instructions relatives à l'emploi du béton armé», codifiant ainsi pour la première fois la conception et le calcul des ponts et des bâtiments avec ce matériau.

Un nouvel essor est apporté par l'invention, vers 1930, du béton précontraint par Eugène Freyssinet. Un pas conceptuel important est alors franchi, qui constitue «une véritable révolution dans l'art de construire», tant par la mise en pratique de la notion de précontrainte que par l'approfondissement de la compréhension du comportement mécanique et rhéologique du béton. L'utilisation de la précontrainte autorise, en effet, la maîtrise de la distribution des contraintes dans la matière. Elle permet, en particulier, de tirer profit de la grande résistance à la compression du béton tout en évitant les inconvénients dus à sa faible résistance à la traction.

La reconstruction qui suit la Seconde Guerre mondiale voit la généralisation de l'emploi du béton précontraint pour la réalisation des ouvrages d'art français. Yves Guyon et Pierre Lebellet précisent alors les principes de calcul des structures précontraintes et mettent à la disposition des ingénieurs les méthodes nécessaires à leur conception. La Société technique pour l'utilisation de la précontrainte (S.T.U.P.) met en œuvre les idées novatrices et les brevets d'Eugène Freyssinet et donne une forte impulsion au développement de l'emploi du béton précontraint dans le monde.

Les recherches menées depuis 1970 sur le béton, et particulièrement sur ses constituants actifs, conduisent à un nouveau bond qualitatif et quantitatif de ses propriétés. Aux États-Unis et au Japon, on fabrique et on met en œuvre, dans les années 1980, des bétons à hautes performances dont la résistance à la compression atteint 100 mégapascals (MPa) (environ 1 000 kg/cm²), et même 140 MPa (1 400 kg/cm²) dans un immeuble à Seattle aux États-Unis. En laboratoire, on obtient, d'ores et déjà, des résistances supérieures à 600 MPa (6 000 kg/cm²).

Bien que toujours composés de ciment, de granulats et d'eau, les bétons à hautes performances sont des matériaux nouveaux qui possèdent des propriétés mécaniques

élevées, associées à une grande durabilité. Les améliorations apportées par l'industrie des liants hydrauliques à la qualité des ciments, la mise au point d'adjuvants spécifiques de synthèse ainsi que l'emploi d'ultrafines ont permis ce progrès spectaculaire.

I-2.2 Constituants du béton :

I-2.2.i) Ciment :

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau. Il forme une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide

I-2.2.ii) Granulats:

Les granulats (sables, gravillons et cailloux) constituent le squelette du béton. Ils doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. Les formations géologiques à partir desquelles il est possible de produire des granulats à béton peuvent être d'origine détritique (essentiellement alluvionnaire), sédimentaire, métamorphique ou éruptive. Selon leur origine, on distingue les granulats roulés, extraits de ballastières naturelles ou dragués en rivière ou en mer, et concassés, obtenus à partir de roches exploitées en carrière.

Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent. La courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passant dans des tamis et passoires de dimensions normalisées.

Par convention, on nomme sables les grains de dimensions comprises entre 0,08 mm et 5 mm, gravillons ceux dont les dimensions sont comprises entre 5 mm et 25 mm et cailloux ceux de dimensions supérieures à 25 mm. Le poids volumique de ces granulats est de l'ordre de 25 à 35 kilo newtons par mètre cube (kN/m³, soit environ 2 500 à 3 500 kg/m³) et leur poids volumique apparent d'environ 14 à 16 kN/m³. On utilise en général, pour les ouvrages courants, des granulats constitués uniquement par du sable et des gravillons.

On emploie également des granulats légers qui sont le plus souvent artificiels et fabriqués à partir de matières minérales, comme les argiles, les schistes (argiles expansées) et les silicates (vermiculite et perlite). Les premiers permettent la fabrication

de bétons de structure légers, dont la résistance peut atteindre de 40 à 50 MPa. Les seconds servent à la fabrication de parois en béton très léger, à fort pouvoir d'isolation thermique. Le poids volumique apparent de ces granulats varie d'environ 0,6 à 8 kN/m³. Malgré leur intérêt technique, leur coût énergétique de fabrication en réduit l'emploi à des applications particulières.

Les granulats lourds sont soit des riblons ou de la grenaille de fer, soit des minéraux naturels comme la magnétite, la limonite ou la barytine. Ils sont utilisés dans les bétons destinés à assurer une protection contre les rayonnements atomiques. Leur poids volumique apparent varie de 30 à 50 kN/m³.

I-2.2.iii) Fillers :

Les fillers sont des matériaux obtenus par broyage ou pulvérisation de certaines roches: calcaires, kieselguhrs, bentonites. Ils ont une finesse comparable à celle du ciment.

I-2.2.iv) Ultrafines :

Les ultrafines sont des particules de très faibles dimensions qui, ajoutées en quantités de l'ordre de 10 p. 100 du poids de ciment, améliorent notablement les performances du béton grâce à leurs propriétés physiques et chimiques. Les fumées de silice, ou microsilles, sont les plus utilisées; ce sont des oxydes de silicium à structure amorphe en forme de microsphères de diamètre de l'ordre de 10 nm (1 nm = 10⁻⁹ m).

I-2.2.v) Eau :

De façon générale, l'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable. Il est exclu d'employer de l'eau de mer, qui contient environ 30 g/l de chlorure de sodium, pour la fabrication de bétons armés ou précontraints.

I-2.2.vi) Adjuvants :

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités (en général moins de 3 p. 100 du poids de ciment, donc moins de 0,4 p. 100 du poids du béton) afin d'en améliorer certaines propriétés. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans la masse du béton. Les principaux adjuvants sont:

Les plastifiants et les fluidifiants réducteurs d'eau.

Les retardateurs de prise du ciment.

Les accélérateurs de prise et de durcissement.

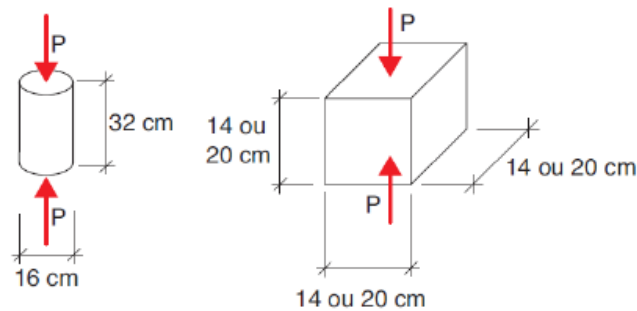
Les entraîneurs d'air.

I-2.3 Propriétés mécaniques :

Seules les propriétés prises en compte par l'ingénieur de génie civil sont ici considérées. De ce point de vue, un béton est défini par les caractères suivants:

– masse volumique: elle varie entre 23 et 24 kN/m³. La présence d'armatures dans le béton armé ou le béton précontraint conduit à prendre en compte une masse volumique de 25 kN/m³ (2 500 kg/m³) dans les calculs;

– résistance à la compression: un béton est défini par la valeur de sa résistance caractéristique à la compression à 28 jours, f_{c28} . En France, par convention, la résistance à la compression du béton est mesurée par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale d'une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur. Les bétons courants ont une résistance de 20 à 30 MPa, ceux de qualité supérieure de 40 à 50 MPa, et les bétons à haute performance peuvent dépasser 100 MPa.



Le diagramme représentatif de la loi de comportement du béton montre que la contrainte maximale de compression f_c est atteinte pour une déformation de l'ordre de 2×10^{-3} . La ruine de l'éprouvette se produit par une déformation ϵ_r de l'ordre de $3,5 \times 10^{-3}$. La pente de la partie linéaire du diagramme définit le module d'élasticité instantané E_i (module de Young). Sa valeur peut être évaluée par des relations empiriques telle que celle qui est définie par les règles françaises: $E_i = 11\,000 f_c^{1/3}$ (MPa). Un béton de 40 MPa de résistance a donc un module de déformation longitudinale instantané de l'ordre de

38 000 MPa :

- résistance à la traction: elle est environ égale au dixième de la résistance à la compression;

- coefficient de dilatation linéaire: sa valeur linéaire est généralement égale à 1×10^{-5} .

En fait, cette valeur s'étend de $0,8 \times 10^{-5}$ (béton à granulats calcaires) à $1,2 \times 10^{-5}$ (béton à granulats siliceux).

I-3 ACIER:

L'acier est un alliage de fer et de carbone qui présente une bonne résistance à la traction.

I-3.1 Différents types d'armatures

Les armatures sont obtenues à partir d'aciers pour béton armé suite à des opérations de dressage (pour les couronnes uniquement), de coupe, de façonnage et d'assemblage. On distingue deux principaux types d'acier selon leur composition chimique:

- l'acier au carbone

- l'acier inox.

Les aciers se présentent sous formes de barres de grande longueur (souvent 12 m) ou de fils en couronnes :

- barres droites lisses : diamètre 5 à 50 mm;

- barres droites à haute adhérence: diamètre 6 à 50 mm;

- fils à haute adhérence en couronne: diamètre 5 à 16 mm.

On distingue les armatures « coupées-façonnées », qui sont obtenues par coupe et façonnage des aciers à la demande (en conformité avec les plans d'exécution définis par les bureaux d'études) et les « armatures assemblées » d'un modèle standard, constituées par assemblage des armatures coupées façonnées sous forme de « cages » ou de « panneaux » et utilisées par des applications courantes (semelles de fondation, poteaux, linteaux, etc.).

Les armatures sont :

- soit assemblées en usine, puis livrées sur le chantier ;

- soit livrées sur chantier coupées, façonnées, puis assemblées sur le site, à proximité de l'ouvrage ou directement en coffrage.

Les armatures sont donc utilisées sur les chantiers et mises en place dans les coffrages :

- soit sous forme de barres (droites ou coupées façonnées en fonction des formes décrites sur les plans d'exécution) ;

- soit sous forme de treillis soudés (réseaux plans à mailles en général rectangulaires, constitués de fils ou de barres assemblés par soudage et dont la résistance au cisaillement des assemblages est garantie) fabriqués en usine et livrés en panneaux.

- soit sous forme d'armatures pré-assemblées en cages ou en panneaux.

Les jonctions des barres peuvent être assurées par recouvrements, par manchons ou par soudure.

En atelier, l'assemblage est réalisé par soudure (soudage par résistance ou soudage semi-automatique). Il s'agit uniquement de soudures « de montage » dont la fonction est d'assurer le bon positionnement des armatures façonnées entre elles, y compris pendant les transports, les manutentions et la mise en place du béton.

Sur chantier, l'assemblage est effectué soit en atelier « forain » installé à proximité de l'ouvrage, soit directement en coffrage. En général, ces deux solutions coexistent. Il est possible de souder sur site, mais le plus souvent le montage se fait par ligatures avec des fils d'attache en acier.

Les dispositifs de raboutage permettent d'assurer la continuité des armatures grâce à une pièce intermédiaire appelée manchon ou couples. La liaison entre le manchon et les armatures est le plus souvent réalisée par filetage ou sertissage.

I-3.2 Désignation des armatures

L'acier pour béton armé est défini par ses caractéristiques de forme, géométriques, mécaniques et technologiques. Les spécifications concernant les aciers sont détaillées dans les normes NF A 35-015 (barres lisses), NF A 35-016 (barres à haute adhérence, couronnes et treillis soudés à verrous), NF A 35-019 (fils et treillis soudés à empreintes), XP A 35-025 (aciers pour béton galvanisés).⁶³

I-3.3 Quelques définitions

> Cadre, étrier, épingle: armature transversale assurant une des fonctions suivantes :

- résistance à des sollicitations tangentes ;
- coutures de recouvrements ;
- maintien du flambement de barres comprimées;
- maintien d’armatures soumises à une poussée au vide ;
- frettage.

> Ancrage par courbure: zone d’armature comportant un façonnage destiné à diminuer la longueur d’armature (crosse, équerre, boucles à plat) assurant la transmission des efforts par adhérence entre l’acier et le béton. Un ancrage par courbure est le plus souvent situé à une extrémité d’armature. Il peut cependant se trouver dans une partie intermédiaire, comme par exemple dans le cas des « boucles à plat » utilisées aux appuis des poutres.

> Coude: partie d’armature façonnée ne répondant pas à une des deux définitions précédentes. Le respect de tolérances sur la position des armatures, pour assurer leur enrobage correct ou la reprise des efforts conformément aux calculs, imposent des précautions durant toute la phase de bétonnage et de vibration. Des cales en béton ou en plastique de divers modèles facilitent la mise en place correcte des armatures et leur maintien, tout en présentant des caractéristiques adaptées à celles du béton.

En général, une structure en béton armé est coffrée et bétonnée en plusieurs phases successives. La continuité du ferrailage entre les parties contiguës de structure au niveau de la reprise de bétonnage est assurée par des « boîtes d’attentes » et des « dispositifs de raboutage ».

Les boîtes d’attentes comportent des armatures façonnées dont une extrémité est repliée à l’intérieur d’un volume creux réalisé sous forme de boîte ou de profilé. L’ensemble ainsi constitué est fixé contre le coffrage à l’intérieur de la partie de structure bétonnée en première phase. Après décoffrage de cette première partie, la boîte est ouverte, en général retirée, et les armatures en attente dépliées. Il est ainsi possible de réaliser un recouvrement avec les armatures de la seconde phase. L’inox pour armatures de béton armé doit être conforme à la norme NF A 35-014 (acier pour béton inox).

Les aciers sont désignés par leur limite d'élasticité garantie R_e en MPa, leur nuance et leur forme (lisse, haute adhérence). Par exemple, un acier HA FeE500-2 désigne un acier à haute adhérence (HA) présentant une limite élastique de 500 MPa et une classe de ductilité.

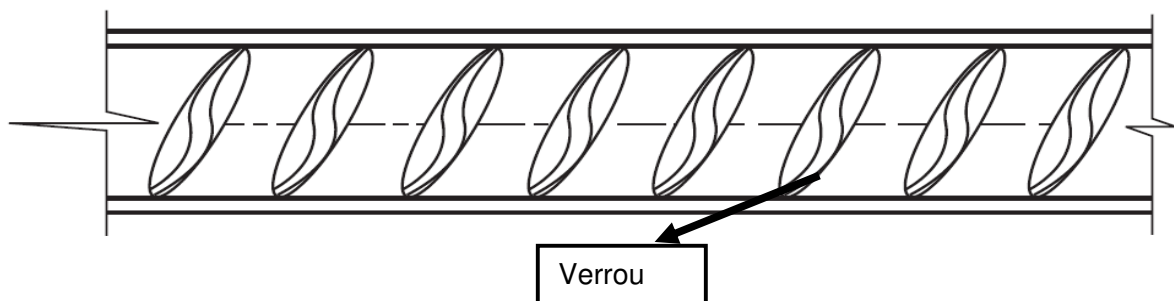
I-3.4 Caractéristiques des aciers

Caractéristiques de forme des aciers

On distingue deux types d'aciers pour béton armé en fonction de leur forme et de leur surface.

- Les aciers lisses : barres lisses ou fils tréfilés lisses. Elles sont de section circulaire sans aucune gravure.
- Les aciers à haute adhérence dont la surface présente des saillies ou des creux. La surface de ces armatures présente des aspérités en saillies inclinées par rapport à l'axe de la barre appelée verrous ou des aspérités en creux appelées empreintes qui sont destinées à favoriser l'adhérence des armatures au sein du béton.

Aciers à verrous



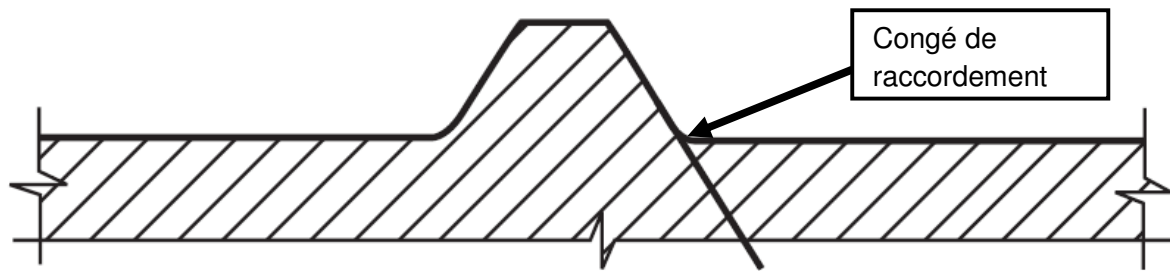


Figure I- 2: Schémas des armatures à verrous

Aciers à empreintes

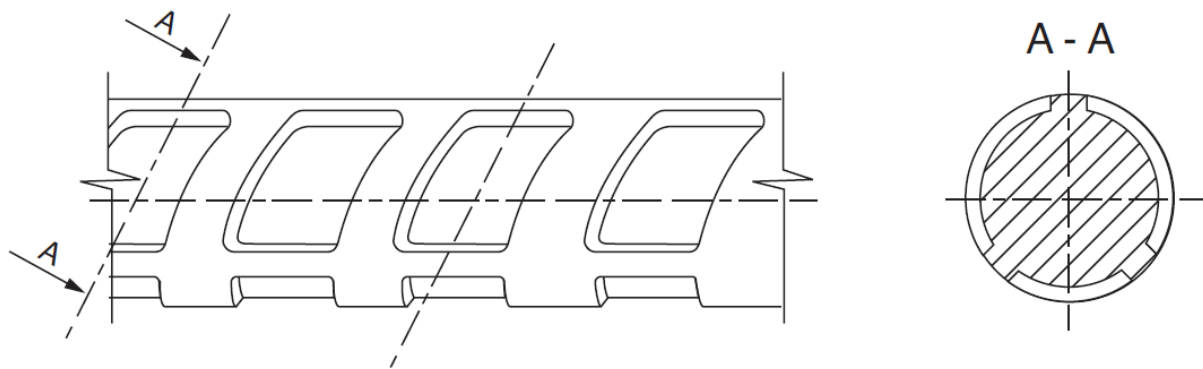


Figure I- 3: Schéma des armatures à empreintes

Caractéristiques géométriques des aciers

Les diamètres prévus par la norme NF EN 10080 sont donnés dans le tableau ci-contre. En France, on se limite en pratique aux diamètres 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14 et 16 pour les couronnes et 6, 8, 12, 14, 16, 20, 25, 32, et 40 pour les barres.

Nota

Le diamètre nominal d'une barre ou d'un fil correspond au diamètre d'un cylindre de révolution de même métal ayant la même masse linéique. C'est le diamètre nominal qui est pris en compte pour le dimensionnement.

La masse volumique des aciers au carbone est prise égale à 7850 kg/m^3 . Pour les aciers inoxydables, la masse volumique dépend de la composition de l'acier. Elle est comprise entre 7700 et 8000 kg/m^3 . 12

I-3.5 Liaison acier béton

Adhérence :

La résistance d'un élément en béton armé et la maîtrise de la fissuration supposent que l'acier ne puisse pas glisser à l'intérieur du béton, c'est-à-dire qu'il y ait adhérence parfaite entre les deux matériaux. L'adhérence des armatures est fonction de leur forme, de leur surface (les saillies ou les creux améliorent l'adhérence) et de la résistance du béton.

Le fonctionnement du béton armé suppose une « association » entre l'acier et le béton qui met en jeu l'adhérence des armatures au béton. Pour utiliser pleinement des aciers plus performants, il faut donc aussi que leur adhérence soit améliorée.

On a par conséquent évolué vers des aciers qui sont à la fois à Haute Limite d'Élasticité (HLE) et à Haute Adhérence (HA). La haute adhérence résulte de la création d'aspérités en saillie ou en creux. La haute limite d'élasticité peut être obtenue par différents moyens :

- par écrouissage, par étirage et ou laminage à froid de barres ou fils d'acier doux;
- par traitement thermique (trempe et autorevenu) de barres ou fils d'acier doux.

L'adhérence est définie par deux coefficients :

- le coefficient de fissuration qui est pris en compte pour les calculs de fissuration du béton;
- le coefficient de scellement qui permet de dimensionner les ancrages des armatures.

Les valeurs de ces coefficients dépendent du type d'armatures (ronds lisses ou barres HA).66

I-3.6 Propriétés pour le dimensionnement

Les propriétés et les règles à appliquer aux armatures sont définies dans la section 3 (article 3.2 –Acier de béton armé) de la norme NF EN 1992-1-1.

Les prescriptions relatives aux aciers se traduisent dans les normes par les caractéristiques spécifiées suivantes :

- soudabilité et composition chimique;
- caractéristiques mécaniques en traction (ft) ;

- limite d'élasticité;
- diamètres, sections, masses linéiques et tolérances;
- adhérence et géométrie de la surface (verrous ou empreintes) ;
- non fragilité (aptitude au pliage) ;
- dimensions et résistance au cisaillement des assemblages soudés des treillis soudés ;
- résistance à la fatigue (caractéristique optionnelle) ;
- aptitude au redressage après pliage (caractéristique optionnelle) ;
- ductilité.

I-3.6.i) Adhérence et géométrie de la surface

Les normes imposent à la géométrie de surface des aciers des caractéristiques permettant d'assurer l'adhérence acier/béton. Les exigences portent sur des valeurs minimales soit de hauteur des verrous, ou de profondeur des empreintes, soit de « surface relative » des verrous f_R , ou des empreintes f_p .

I-3.6.ii) Non fragilité (aptitude au pliage)

L'armature doit s'adapter lors des opérations de façonnage à des formes complexes ce qui implique courbures et pliages; l'acier doit donc présenter une bonne aptitude au pliage. L'acier est soumis à un pliage, sur un mandrin dont le diamètre est fixé en fonction de celui de l'acier suivi d'un dépliage. L'essai est satisfaisant s'il ne se produit ni cassure ni fissure transversale dans la zone de pliage-dépliage.

I-3.6.iii) Caractéristiques mécaniques en traction

La résistance mécanique d'un acier est déterminée par un essai de traction normalisé, elle est caractérisée par :

- la résistance maximale à la traction: R_m ;
- la limite d'élasticité ou module d'élasticité: R_e ;
- le rapport résistance à la traction/limite d'élasticité: R_m/R_e ;
- l'allongement sous charge maximale: A_{gt} .

I-3.6.iv) Limite d'élasticité R_{re}

Le diagramme contrainte-déformation des aciers laminés à chaud comporte un palier de ductilité qui met en évidence la limite d'élasticité supérieure découlement ReH qui est aussi la limite d'élasticité Re .

Le diagramme contrainte-déformation des aciers laminés à froid et des inox ne comporte pas de palier. Dans ce cas, la limite d'élasticité Re est fixée conventionnellement égale à $RP_{0,2}$ qui est la contrainte correspondant à 0,2 % d'allongement rémanent (ou limite conventionnelle d'élasticité).

Actuellement en France, on utilise des aciers de 500MPa de limite d'élasticité. La norme NF EN 1992 Partie 1-1 prévoit une plage de limite d'élasticité comprise entre 400 MPa et 600 MPa.

I-3.6.v) Caractéristiques de ductilité R_m/R_e et A_{gt}

Les normes françaises fixent des valeurs minimales pour le rapport résistance à la traction/limite d'élasticité (R_m/Re), et pour l'allongement sous charge maximale (A_{gt}).

I-3.6.vi) Résistance

La limite d'élasticité f_y et la résistance à la traction f_t sont respectivement définies comme les valeurs caractéristiques de la limite d'élasticité et de la charge maximale en traction directe, divisée par l'aire nominale de la section.

I-3.6.vii) Diagramme contrainte-déformation

Un acier soumis à une contrainte de traction croissante s'allonge de façon linéaire et réversible jusqu'à un point correspondant à sa limite d'élasticité.

Au-delà, la déformation non réversible présente une courbe du type ductile (selon le traitement de l'acier).

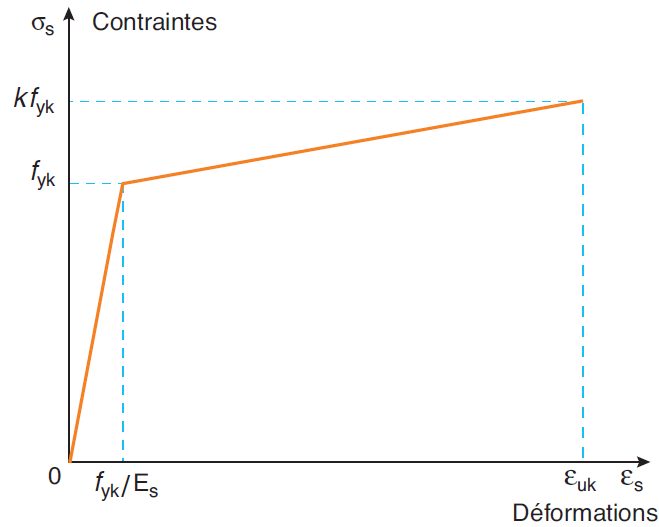


Figure I- 4: diagramme contraintes déformations pour l'acier

Ce diagramme comprend:

- une branche élastique: f_{yk}/E_s ; f_{yk}
- une branche inclinée: ϵ_{uk} , $k f_{yk}$

Avec :

f_{yk} limite caractéristique d'élasticité de l'acier de béton armé

ϵ_{uk} déformation relative de l'acier de béton armé

k fonction de la classe d'armature Les propriétés des armatures sont précisées dans l'Annexe C (tableau C1) de la norme NF EN 1992-1-1.

Ce tableau distingue 3 classes de ductilité et précise les caractéristiques correspondant à ces trois classes.

Tableau 13: propriétés des armatures compatibles avec l'Eurocode béton							
Forme du produit	Barres et fils redressés			Treillis soudés			Exigence ou valeur du fractile (%)
Classe	A	B	C	A	B	C	-
Limite caractéristique d'élasticité f_{yk} ou $f_{0,2k}$ (MPa)	400 à 600						5,0
Valeur minimale de $k = (f_t / f_y)_k$	$\geq 1,05$	$\geq 1,08$	$\geq 1,15$ $< 1,35$	$\geq 1,05$	$\geq 1,08$	$\geq 1,15$ $< 1,35$	10,0
Valeur caractéristique de la déformation relative sous charge maximale, ε_{uk} (%)	$\geq 2,5$	$\geq 5,0$	$\geq 7,5$	$\geq 2,5$	$\geq 5,0$	$\geq 7,5$	10,0

Tableau 1.3 :Extrait du tableau C1 de l'Annexe C de la norme NF EN 1992-1-1.

Conclusion du chapitre :

Dans une structure en béton armé, les aciers principaux sont positionnés dans les parties tendues du béton pour compenser la mauvaise résistance du béton en traction. L'analyse de cette recherche bibliographique, nous oriente vers les techniques de confinement de béton pour améliorer les résistances des éléments poutres soumises à un chargement de flexion. Dans le chapitre qui suit, nous rappelons quelques techniques de confinement existantes et surtout la proposition de la technique de confinement par précontrainte induite développée par le professeur Ait tahar K (UMMTO).

Chapitre II :

Techniques de confinement des structures

CHAPITRE II : TECHNIQUES DE CONFINEMENT DES STRUCTURES

II-1 INTRODUCTION:

L'amélioration de la portance des éléments structurants en génie civil est la quête principale des concepteurs. Les éléments en béton armé soumis à des moments fléchissant exigent plus de sections d'acier par rapport à ceux soumis à la flexion composée.

L'idée de minimiser l'acier en utilisant les sections de béton confiné par des spirales est développée dans ce chapitre. Le mécanisme de confinement dans des poutres en béton armé renforcé par des spirales ainsi que les divers facteurs affectant le comportement du béton confiné sont également discutés. Et enfin on propose une nouvelle technique de confinement.

II-2 COMPORTEMENT DU BETON EN COMPRESSION :

Bien que le béton soit constitué de matériaux élastiques et fragiles (granulats, pâte de ciment), son comportement en compression, que l'on traduit principalement par une relation contrainte-déformation, est non linéaire et présente une certaine pseudo-ductilité liée à la microfissuration du matériau.

La courbe caractéristique reliant les contraintes aux déformations obtenue lors des essais de compression uni-axiaux sur un cylindre en béton est présentée sur la figure (II.1).

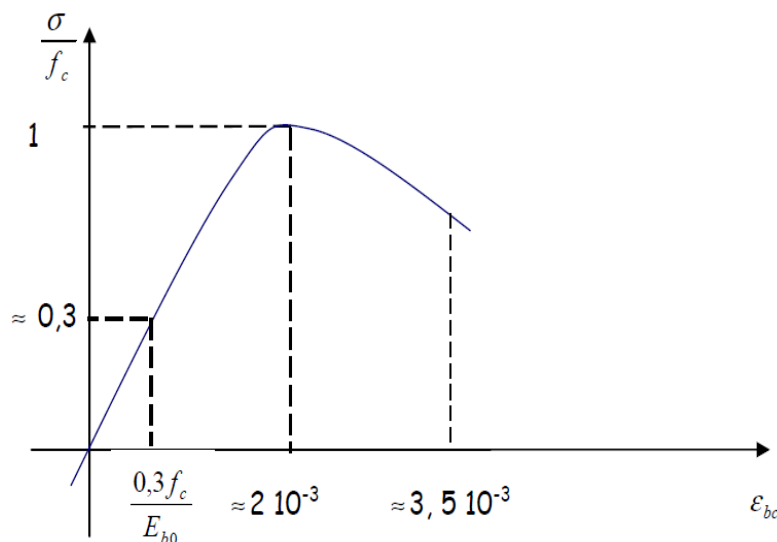


Figure II- 1 : Comportement du béton en compression uni-axiale

On distingue les phases suivantes :

La déformation croît de façon linéaire jusqu'à environ 30% de la contrainte ultime.

Entre 30 et 100% la contrainte ultime de la courbe s'incurve et le comportement devient non linéaire. Ceci correspond à l'apparition puis le développement des fissures verticales dans l'éprouvette.

L'atteinte du pic définit la contrainte ultime qui caractérise la résistance du béton à la compression. Elle correspond à une déformation de l'ordre 2%.

La rupture se produit au delà du pic avec fissuration verticale et écrasement de l'éprouvette. Elle correspond à une déformation de l'ordre de 3.5%

La réponse du béton à la compression uni axiale est déterminée habituellement en chargeant des cylindres de béton dont le rapport entre la hauteur et le diamètre est de 2. La figure II.2 montre les courbes contraintes – déformations obtenues sur des cylindres en béton chargés en compression uni axiale.

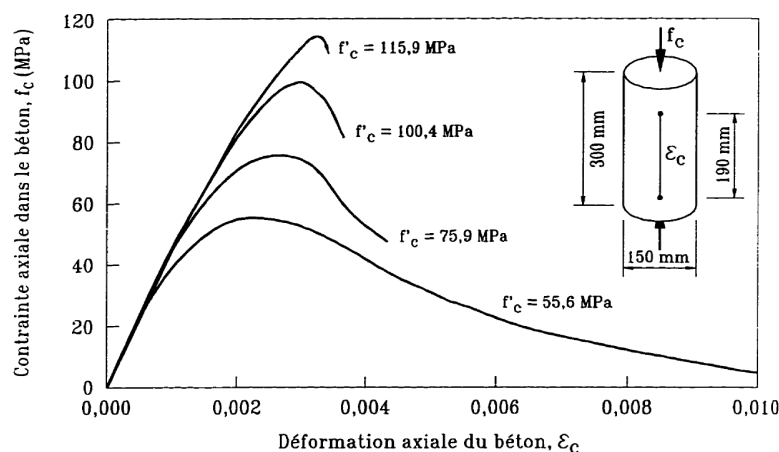


Figure II- 2: Courbes contrainte-déformation pour des bétons de différentes résistances

En observant les courbes contraintes déformations des bétons à haute performances illustrées par la figure II.2, on remarque que, plus la résistance augmente, plus la courbe descendante devient abrupte, tandis que la rigidité et la linéarité initiale de la courbe augmentent. On peut donc s'attendre à observer un comportement plus fragile des poteaux en béton à haute performance. De plus, à cause de la plus faible expansion latérale des BHP, l'acier transversal serait sollicité plus tardivement, ce qui entraînerait une diminution de l'efficacité du confinement.

II-3 COMPOTEMENT DU BETON CONFINE:

Plusieurs auteurs ont prouvé que le confinement des colonnes en béton chargées axialement augmente la résistance et la ductilité de ces colonnes d'une quantité considérable.

Lorsque le béton est soumis à une compression axiale, celui-ci se déforme latéralement. Cette déformation produit une fissuration qui augmente avec l'accroissement de la charge et qui conduit finalement à la rupture du béton. Si le béton est retenu latéralement de façon à réduire cette déformation, la résistance du béton et sa ductilité seront augmentées. Ce phénomène est communément appelé confinement du béton. Le confinement de béton qui consiste à empêcher ces déformations, peut être réalisé soit par une enveloppe externe, soit par un faible espacement entre les étriers. La figure II.3 présente les courbes typiques contraintes déformations pour des bétons confinés et non confinés. Cette figure met en évidence les différences de comportement entre ces deux bétons. Le confinement augmente en général deux caractéristiques du béton: la résistance en compression $f_{cc} > f_{co}$ et la déformation correspondant à la contrainte ultime de compression $\epsilon_{cc} > \epsilon_{co}$.

Le confinement augmente considérablement le pouvoir absorbant d'énergie du béton. Ainsi dans des régions sismiques, le renfort est fourni pour confiner le béton et par conséquent pour augmenter la ductilité des colonnes et des poutres

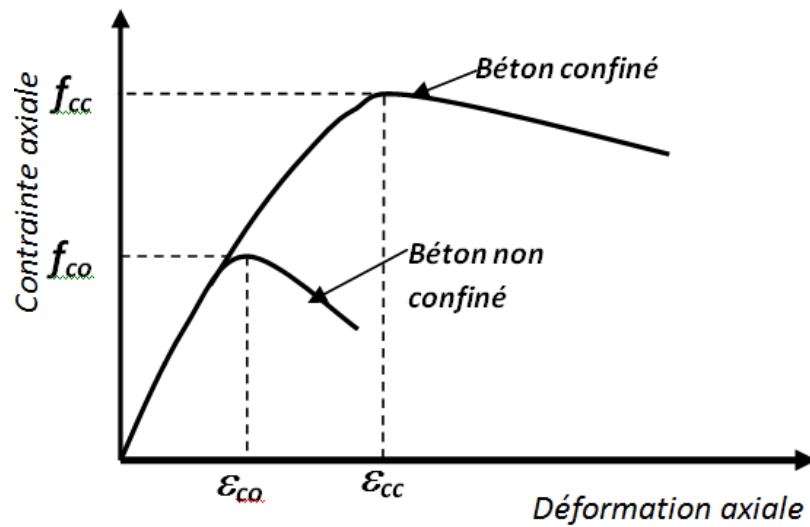


Figure II- 3: Courbes contraintes déformations d'un béton confiné et non confiné

II-4 MECANISME DE CONFINEMENT :

Le confinement du béton peut être réalisé au moyen de cadres fermés ou d'armatures transversales. Il permet de d'obtenir des résistances supérieures ($f_{ck,c} > f_{ck}$) fig et des déformations critiques plus élevées ($\epsilon_{c2,c} > \epsilon_{c2}$; $\epsilon_{cu2,c} > \epsilon_{cu2}$). Vis à vis du calcul, les autres caractéristiques de base peuvent être non affectées. Ce renfort longitudinal, applique alors une réaction d'emprisonnement sur le béton et par conséquent le béton présente le comportement d'un béton confiné.

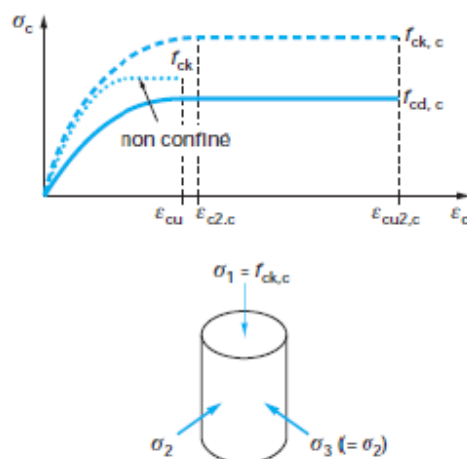


Figure II- 4: diagramme des contraintes déformations dans le cas de béton confiné.

II-5 TECHNIQUE DE CONFINEMENT PAR PRECONTRAINTE INDUITE : TECHNIQUE DE AIT TAHAR K.

Le béton résiste mieux en compression, sa résistance en traction est limitée ce qui provoque sa fissuration puis sa rupture. Si on soumet une poutre en béton armé sur deux appuis simples à une charge, elle se déforme. La section transversale, au droit de l'application de la charge se trouve comprimée à la fibre supérieure et tendue à la fibre inférieure..

Lorsque la charge est élevée, des fissures apparaissent à la partie inférieure de la poutre. Notre objectif est de transformer la traction en compression ou diminuer l'effort de traction. Parmi les méthodes utilisées, la méthode de confinement du béton par spirale, est une méthode novatrice qui a pour but d'affaiblir les efforts de traction dans le béton dans la zone de traction.

II-5.1 La précontrainte induite :

Le confinement du béton de la zone tendue d'une poutre soumise à la flexion, résultant par le façonnage des armatures en acier sous forme d'une succession de boucles. Sous chargement ultime, la capacité portante est nettement améliorée par l'effet de la participation du béton situé en zone tendue qui se trouve grâce à ce procédé confiné par précontrainte.

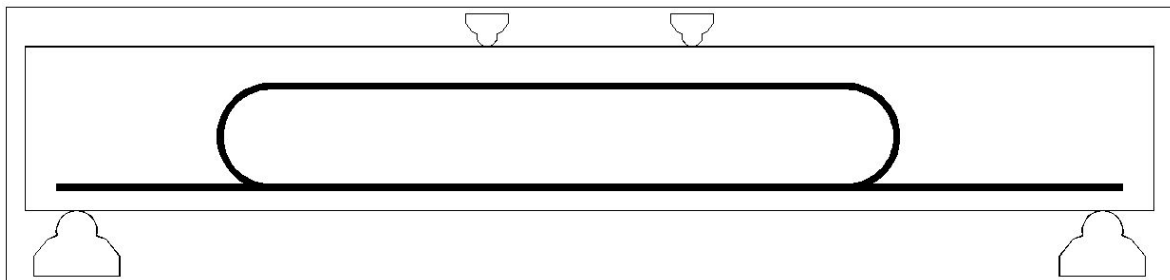


Figure II- 5:poutre soumise à une précontrainte induite

II-5.2 Principe de confinement de béton par des spirales

Le confinement du béton rend le béton plus résistant, il augmente sa résistance à la compression ce qui fait augmenter sa résistance en traction ainsi que des déformations critiques plus élevées. Cette méthode crée la précontrainte auto-induite (si on augmente la charge le confinement de béton augmente donc on comprime mieux la zone de béton soumise à la traction).

II-6 MODELISATION DU COMPORTEMENT A LA COMPRESSION D'UN BETON CONFINE :

L'étude théorique des éléments en béton armé, montre que le comportement mécanique du béton comprimé est une modélisation élastique linéaire suivi par une courbe non linéaire. Dans le cas du renfort collé sur l'extérieur de la face de l'élément, il faut tenir compte du traitement de surface, l'influence du glissement et la rupture prématurée à l'interface due au décollement de la plaque influe directement sur la rigidité et la résistance. Les études expérimentales montrent les modes de rupture de l'interface par le couplage de cisaillement et des contraintes normales ou une rupture en traction de la couche de béton située entre le matériau composite et les aciers.

Plusieurs expressions, citées dans la littérature, estimant la contrainte de béton confiné f_{cc} et la déformation axiale au pic ϵ_{cc} . Un résumé de certaines des expressions est présenté dans le tableau I. Presque tous les modèles analytiques ont été développés sur la base des études expérimentales.

II-7 PRINCIPE DE CONFINEMENT DU BETON PAR DES SPIRALES :

Dans les concepts classiques du béton armé, nous avons pour un élément structural soumis à un moment fléchissant un équilibre des sections des matériaux utilisés accolés par adhérence.

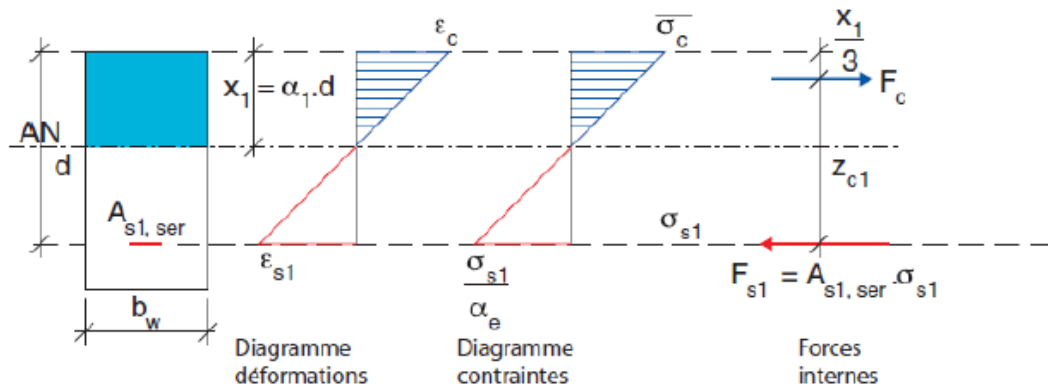


Figure II- 6:diagramme des déformations Béton armé

Le béton confiné avec spirales s'appuie sur le principe précédent en y ajoutant l'idée d'un treuil formé par des cerces de l'acier utilisé comme renfort de la section tendue.

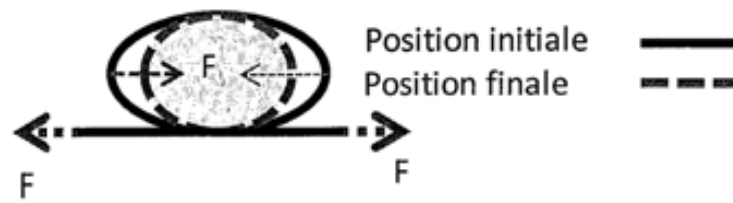


Figure II- 7: Béton confiné avec spirale

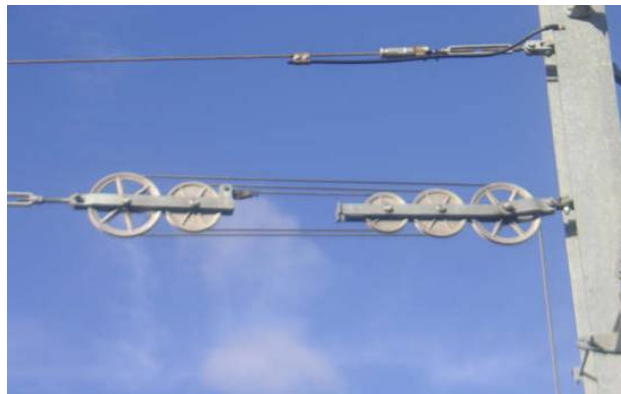


Figure II- 8: analogie du confinement avec Spirales

Et étant donné que physiquement l'équilibre est une égalité des moments des efforts internes et externes, le confinement nous donne la possibilité d'utiliser le béton comprimé par comme section surabondante du côté de l'équilibre interne.

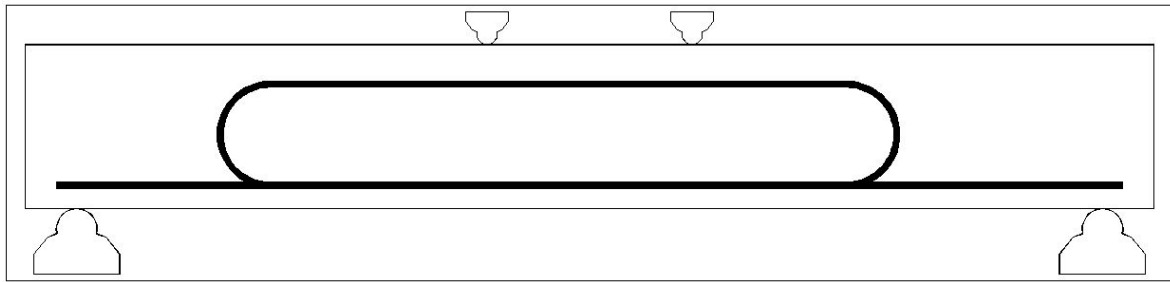


Figure II- 9: schéma de poutre confinée avec spirales

Les spirales de confinement ne commencent à travailler qu'après un déséquilibre où le moment ultime dépasse le moment résistant et ce qui fait que les calculs et les approches de dimensionnement ne se font qu'en pérennant en charge le stade poste-élastique des structures.

Si F est la force résultante qui suppose être l'effort réduit ponctuel au milieu du cerce de confinement, nous pouvons supposer le cheminement simplificateur aboutissant au calcul du confinement du béton ;

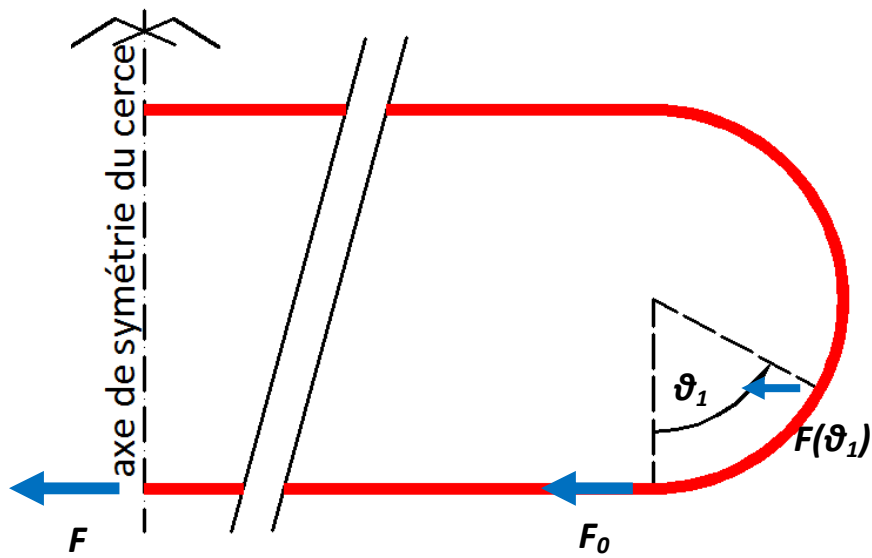


Figure II- 10: schéma de répartition de l'effort dans la spirale

II-7.1 Calcul de F :

Le calcul de F se fait en supposant que cette force équilibre résidu du moment ultime de calcul décrétementé du moment résistant de la section conne (béton armé) :

$$F = \frac{M_u - M_r}{d} \dots \dots \dots II - 1$$

Mu : moment fléchissant ultime sollicitant la structure.

Mr : moment fléchissant résistant de la structure.

d : bras de levier de l'effort.

Ainsi la valeur de l'effort de F est proportionnelle à l'écart entre moment ultime et moment résistant.

II-7.2 Calcul de F₀ :

II-7.2.i) Cas de segment de barre rectiligne :

Pour trouver l'expression de F supposons le schéma suivant se produisant à échelle infinitésimale de segment de barre de la structure choisie.

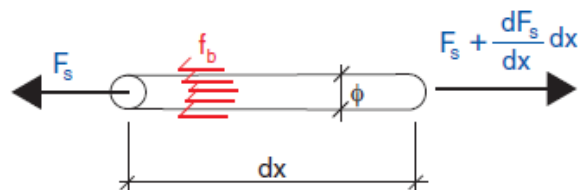


Figure II- 11:Calcul infinitesimal de l'effort

Nous obtenons par projection :

$$F_s + \frac{dF_s}{dx} \cdot dx - F_s - f_b \cdot \pi \cdot \phi \cdot dx = 0 \dots \dots \dots II - 2$$

Ce qui donne :

$$F_r = \int_0^l f_b \cdot \pi \cdot \phi \cdot dx = f_b \cdot \pi \cdot \phi \cdot l \dots \dots \dots II - 3$$

$$F_0 = F - f_b \cdot \pi \cdot \phi \cdot l \dots \dots \dots II - 4$$

II-7.2.ii) Cas de segment de barre courbe :

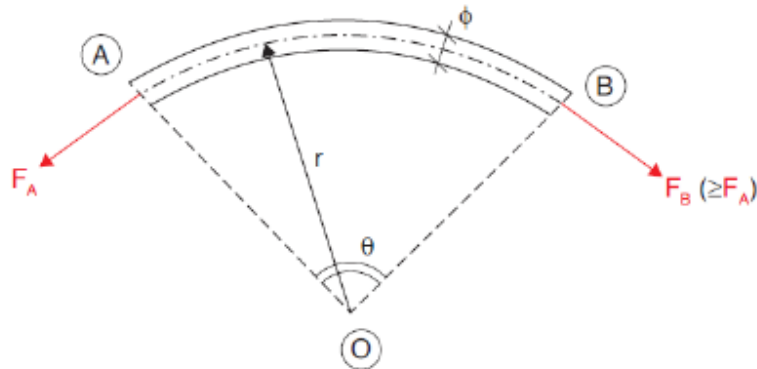


Figure II- 12:efforts dans une barre courbe

En faisant le même raisonnement que précédemment et en considérant un segment de barre infinitésimal, représenté par sa ligne moyenne AB et d'ouverture $d\theta$.

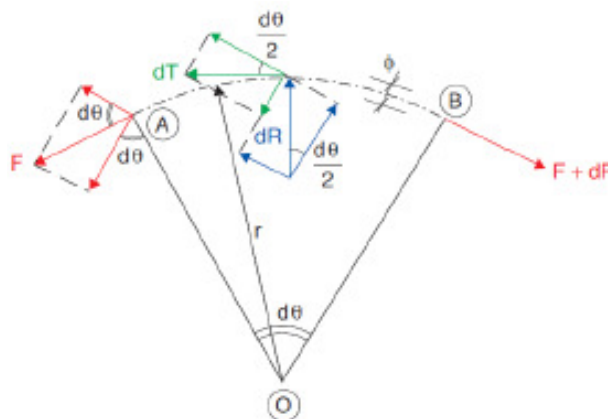


Figure II- 13:projection des efforts dans une barre courbe

Il est soumis :

- aux forces de traction F en A et $F+dF$ en B.
- à la force dT à l'adhérence sur l'arc $AB = r \cdot d\theta$
- à la réaction transversale du béton dR .

Par projection des forces sur le rayon OB :

$$-F \sin d\theta - F \sin \frac{d\theta}{2} + dR \cdot \cos \frac{d\theta}{2} = 0 \dots \dots \dots II - 5$$

Puisque $d\theta$ et dT sont infiniment petits et en négligeant les infiniment petits du second ordre, on peut écrire :

$$dR = F d\theta \dots\dots\dots II - 6$$

En désignant par μ le coefficient de frottement acier béton, l'effort dR développe une force tangentielle opposée au sens de glissement de la barre. Par projection des forces sur la tangente de en B à la barre on obtient :

$$F + dF - F \cos d\theta - \mu \cdot F \cdot d\theta - dT \cdot \cos \frac{d\theta}{2} = 0 \dots\dots\dots II - 7$$

Ce qui donne :

$$dF + \mu \cdot F \cdot d\theta - \pi \cdot \Phi \cdot R \cdot d\theta \cdot f_{bd} = 0 \dots\dots\dots II - 8$$

Que l'on peut écrire sous la forme suivante

$$dF - \mu \cdot d\theta \left[F + \frac{\pi \cdot \Phi \cdot R \cdot f_{bd}}{\mu} \right] = 0 \dots\dots\dots II - 9$$

Ou :

$$\left[F + \frac{\pi \cdot \Phi \cdot R \cdot f_{bd}}{\mu} \right] = \mu \cdot d\theta \dots\dots\dots II - 10$$

Par intégration entre A et B, il vient :

$$\ln \left(F + \frac{\pi \cdot \Phi \cdot R \cdot f_{bd}}{\mu} \right)_A^B = \mu \cdot \theta \dots\dots\dots II - 11$$

Ce qui donne en :

$$F = F_0 e^{-\mu\theta} + \frac{\pi \cdot \Phi \cdot R \cdot f_{bd}}{\mu} (e^{-\mu\theta} - 1) \dots\dots\dots II - 12$$

II-7.2.iii) Une règle confirmée par une exception :

Cas où il n'y a pas d'adhérence $\mu=0.0$:

$$F = F_0 e^{-\mu\theta} + \frac{\pi \cdot \Phi \cdot R \cdot f_{bd}}{\mu} (e^{-\mu\theta} - 1) \dots\dots\dots II - 13$$

$$\lim_{\mu \rightarrow 0} \frac{(e^{-\mu\theta} - 1)}{\mu} = \theta \text{ et } \lim_{\mu \rightarrow 0} e^{-\mu\theta} = e^0 = 1 \dots\dots\dots II - 14$$

Ce qui donne le résultat trivial :

$$F = F_0 + \pi \cdot \Phi \cdot l \cdot f_{bd} \dots\dots\dots II - 15$$

Cas où il n'y a de courbes $R \rightarrow \infty$:

$$F = F_0 \cdot e^{-\mu \frac{l}{R}} + \frac{\pi \cdot \Phi \cdot R \cdot f_{bd}}{\mu} \left(e^{-\mu \frac{l}{R}} - 1 \right) \dots \dots \dots II - 16$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} F = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(F_0 \cdot e^{-\mu \frac{l}{R}} + \frac{\pi \cdot \Phi \cdot l \cdot f_{bd}}{\mu \cdot \frac{l}{R}} \left(e^{-\mu \frac{l}{R}} - 1 \right) \right) \dots \dots \dots II - 17$$

Ce qui aboutit au même résultat de cas de segment rectiligne :

$$F = F_0 + \pi \cdot \Phi \cdot l \cdot f_{bd} \dots \dots \dots II - 18$$

II-7.3 Calcul de et analyse de la fonction f(θ) :

Une conjugaison des deux cas précédents conduit à l'expression de F par projection :

$$F(\theta) = ((F_0 + A)e^{-\mu\theta} - A) \cdot \sin \theta \dots \dots \dots II - 19$$

Tel que ;

$$A = \frac{\pi \cdot \Phi \cdot R \cdot f_{bd}}{\mu} \dots \dots \dots II - 20$$

II-7.4 Calcul de θ1:

La valeur de θ1 est la valeur θ qui annule la valeur de F ; F(θ1)=0 .Ce qui donne

$$\theta_1 = \frac{1}{\mu} \cdot \ln \left(\frac{F_0 + A}{A} \right) \dots \dots \dots II - 21$$

II-7.5 Détermination du point d'application de l'effort de confinement :

La formule analytique de F(θ) est explicitée reste à déterminer son bras de levier pour arriver à déterminer son moment. Ce bras de levier n'est autre que la position de centre de gravité CG de l'aire inclus entre la fonction F(θ) et l'axe des abscisses θ.

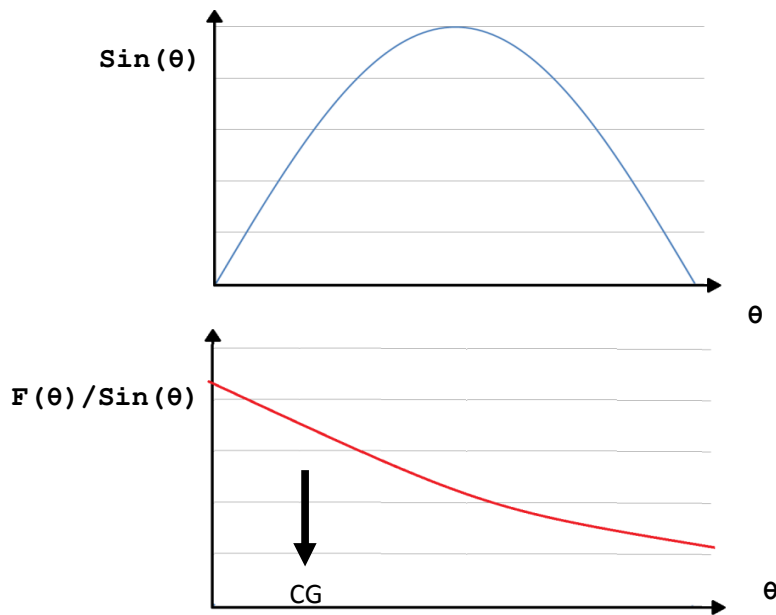


Figure II- 14:fonction de répartition de l'effort de confinement

Analytiquement l'expression du CG s'écrit :

$$CG = \frac{\int_0^{\theta_1} \theta \cdot F(\theta) \cdot d\theta}{\int_0^{\theta_1} F(\theta) \cdot d\theta} \dots\dots\dots II - 22$$

$$\begin{aligned} \int_0^{\theta_1} \theta \cdot F(\theta) d\theta &= \int_0^{\theta_1} \theta \cdot ((F_0 + A)e^{-\mu\theta} - A) \cdot \sin \theta d\theta \\ &= (F_0 + A) \cdot \int_0^{\theta_1} \theta \cdot e^{-\mu\theta} \cdot \sin \theta d\theta - A \cdot \int_0^{\theta_1} \theta \cdot \sin \theta d\theta = (F_0 + A) \cdot I_1 - A \cdot I_2 \end{aligned}$$

Tel que :

$$I_1 = \left[\frac{-e^{-\mu\theta}}{\mu^2 + 1} \cdot \left(\theta(\mu \cdot \sin \theta + \cos \theta) + \frac{1}{\mu^2 + 1} ((\mu^2 - 1) \cdot \sin \theta + 2\mu \cdot \cos \theta) \right) \right]_0^{\theta_1}$$

$$I_2 = \sin \theta_1 - \theta_1 \cdot \cos \theta_1 \dots\dots\dots II - 23$$

$$\int_0^{\theta_1} F(\theta) d\theta = (F_0 + A) \cdot \int_0^{\theta_1} e^{-\mu\theta} \cdot \sin \theta d\theta - A \cdot \int_0^{\theta_1} \sin \theta d\theta = (F_0 + A) \cdot I_3 - A \cdot I_4$$

$$I_3 = \int_0^{\theta_1} e^{-\mu\theta} \cdot \sin \theta d\theta = \left[\frac{-e^{-\mu\theta}}{\mu^2 + 1} \cdot (\mu \cdot \sin \theta + \cos \theta) \right]_0^{\theta_1} = \frac{1}{\mu^2 + 1} - \frac{-e^{-\mu\theta}}{\mu^2 + 1} \cdot (\mu \cdot \sin \theta + \cos \theta)$$

$$I_4 = \int_0^{\theta_1} \sin \theta \, d\theta = 1 - \cos \theta_1 \dots \dots \dots II - 24$$

Et l'expression du CG devient :

$$CG = \frac{(F_0 + A).I_1 - A.I_2}{(F_0 + A).I_3 - A.I_4} \dots \dots \dots II - 25$$

Conclusion du chapitre :

La technique proposée permet d'améliorer le comportement des poutres soumises à des sollicitations de flexion. En effet, le principe de conversion des efforts de traction en efforts de compression permet de créer une précontrainte induite par le rétrécissement de la boucle spirale. Le béton qui se trouve alors emprisonné à l'intérieur de la boucle sera soumis à une compressions, d'où l'amélioration de son comportement mécanique. Dans le chapitre suivant, nous présentons le développement d'une application de simulation pour appréhender le comportement de telles structures.



Chapitre III :

Développement d'une application de simulation

CHAPITRE III-DEVELOPPEMENT D'UNE APPLICATION DE SIMULATION

III-1 PRESENTATION:

Arriver à mettre sous épreuve numérique, de multiples cas expérimentaux de poutres en béton confiné par des cerces façonnés par les barres longitudinales, en faisant varier un paramètre géométrique ou mécanique. Tous ces cas exigent une saisie géométrique rapide, interactive et en temps réel et ce pour chaque cas de figure. Manuellement ou sur une calculatrice ordinaire, ça relève de l'impossible et un recours à un outil (logiciel) fait sur mesure est inévitable.

Au cours de ce chapitre sera développé la création de cette application, le résonnement aboutissant et l'explicitation des contraintes (logiciels, matériel, ressources...).

III-2 POSITION DU PROBLEME MECANIQUE:

Faire une analyse multiparamétrique sur des poutres en béton armé confiné par le mandrin de cintrage des barres longitudinales façonnées sous formes de cerces. fig1

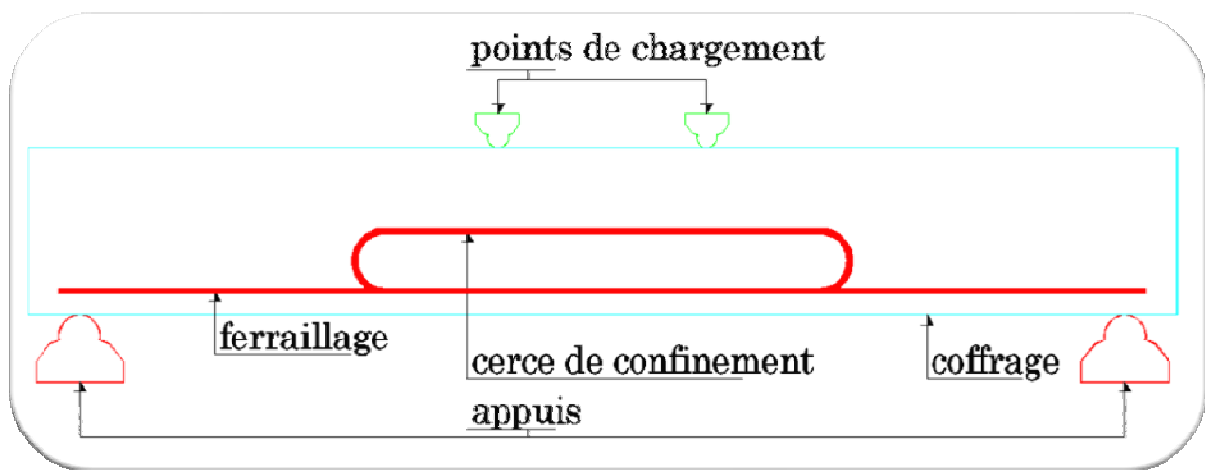


Figure III- 1 : schémas de principe du dispositif expérimental

Pour faire, on fixe la distance entre les 2 appuis et l'écart entre les deux 2 points de chargement comme au mode expérimental schématisé dans la figure 2 ci dessous (unités métriques).

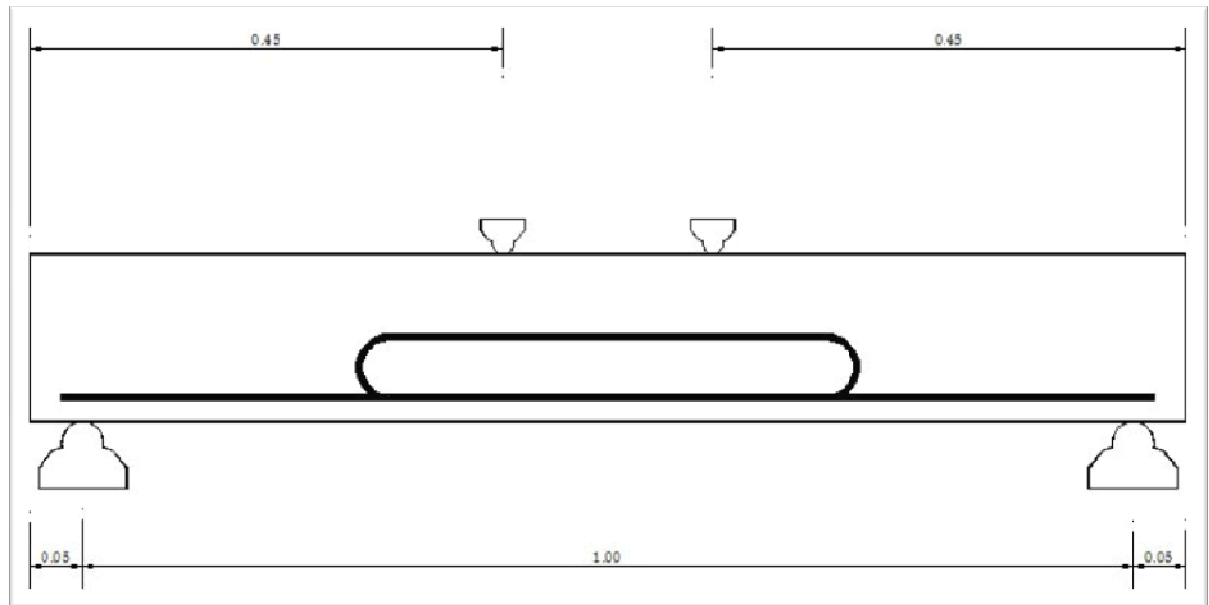


Figure III- 2 : schémas de la géométrie du dispositif expérimental

III-3 OUTILS DE PROGRAMMATION ET OPTIONS CHOISIES:

L'application doit avoir

Un noyau de calcul mécanique "processeur" capable de recevoir le modèle à analyser avec tous ces paramètres.

Un "préprocesseur" interactif pouvant laisser l'utilisateur voir ce qu'il projette en temps réel et ce pour éviter toute erreur de saisie.

III-3.1 Exigences sur le processeur et orientation de choix :

La difficulté du problème et le nombre de ses paramètres poussent à utiliser un processeur éléments finis. Ces processeurs éléments finis doivent faire une analyse sur des cas amorphes, ce qui limite le choix sur les moteurs éléments finis existants et libre de distribution à deux.

III-3.1.i) Code_Aster :

C'est un logiciel libre de simulation numérique en mécanique des structures, développé principalement par le département « Analyses Mécaniques et Acoustiques » du service R&D (anciennement DER) d'EDF (électricité de France).

ASTER signifie "Analyses des Structures et Thermomécanique pour des Études et des Recherches». C'est un logiciel complexe, dont la réalisation a débuté en 1989, pour répondre aux besoins internes d'EDF. Il a été placé sous licence GNU GPL en octobre 2001. Le cœur du système est codé en Fortran, et de nombreux modules complémentaires sont réalisés en Python. Il comporte plus d'un million de lignes de code, de nombreux cas de tests, ainsi qu'une énorme documentation. Des versions stabilisées sont diffusées environ deux fois par an sous forme de paquet à compiler. Ces versions peuvent être mises à jour hebdomadairement vers la dernière version de développement.

C'est principalement un solveur, basé sur la théorie de la mécanique des milieux continus, qui utilise la méthode des éléments finis pour résoudre différents types de problèmes mécaniques, thermiques, acoustiques, sismiques, etc.

Son code source est librement téléchargeable depuis le site du projet. Les principales distributions Linux ainsi que FreeBSD proposent des paquets binaires. Certaines versions pour Windows sont proposées sur la page SourceForge, avec presque les mêmes fonctionnalités que les versions sous Linux/Unix. Il existe aussi le LiveDVD CAE Linux spécialement consacré à la CAO et qui inclut Code_Aster.

III-3.1.ii) Castem :

C'est un logiciel de calcul par la méthode des éléments finis pour la mécanique des structures et des fluides. Cast3M est développé au Département de Modélisation des Systèmes et Structures (DM2S) de la Direction de l'Énergie Nucléaire du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA).

Le développement de Cast3M entre dans le cadre d'une activité de recherche dans le domaine de la mécanique dont le but est de définir un instrument de haut niveau, pouvant servir de support pour la conception, le dimensionnement et l'analyse de structures et de composants.

Dans cette optique, Cast3M intègre non seulement les processus de résolution (solveur) mais également les fonctions de construction du modèle (pré-processeur) et d'exploitation des résultats (post-traitement). Cast3M est un logiciel « boîte à outils » qui permet à l'utilisateur de développer de fonctions répondant à ses propres besoins. Cast3M est notamment utilisé dans le secteur de l'énergie nucléaire, comme outil de simulation ou comme plateforme de développement d'applications spécialisées. En particulier, Cast3M est utilisé par l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) dans le cadre des analyses de sûreté des installations nucléaires françaises. »

Par souci de rapidité de développement, le choix se porte sur l'application Castem

III-3.2 Exigences sur le préprocesseur et orientation de choix :

Créer une interface de saisie interactive avec une grande précision en temps réel donne accès à une multitude de choix qui sont:

III-3.2.i) Interface vierge avec un objet image où sera schématisé le montage expérimental:

Le problème avec ce cas est qu'il est très restrictif étant donné que l'Object-image ne stocke et n'affiche que l'information plane (2D). Si un algorithme est associé, les informations d'épaisseur de coffrage-ferraillage doivent être stockées dans des piles annexes ce qui encombre la mémoire vive et même les flux de données seront difficiles. Et si une erreur de saisie existe en volumique (barre de ferraillage hors coffrage, épaisseur excessive), elle n'apparaît pas et le modèle n'aura pas de signification physique et ne peut s'accorder avec l'expérimental.

III-3.2.ii) Interface vierge avec un objet viewer3D où sera schématisé le montage expérimental:

La bibliothèque la plus utilisée actuellement est soit OpenGL ou DirectX. L'interaction est bonne mais la saisie graphique est limitative en termes de zooms et d'accrochage aux éléments graphique et la saisie des dimensions. En plus l'interface crée deviendra avec ses méthodes et propriétés internes, une boîte noire où une évolution future (amélioration ou adaptation pour d'autres problèmes de la mécanique) est trop limitée.

III-3.2.iii) Utilisation des interfaces de la CAO:

Utiliser les interfaces existantes de la CAO est de nos jours couramment utilisée dans le domaine du génie logiciel. En fait les grandes multinationales de la conception laissent ouvert leur code sources avec la documentation nécessaires pour pouvoir y rajouter des extensions à la guise des développeurs. Exemple :

- Sur microstation : nous trouvons Inroads, Mxroad(pour les tracés routiers et voies ferrées) et MixBridges(pour les ponts mixtes et béton armé) qui sont des exemples d'extension et bien d'autres.
- Sur Autocad : nous trouvons bien plus d'extensions à l'image de Covadis (calcul topométrique), ASD pour les projeteurs béton armé et la BIM sur Robot structural analysis, de sealand civil design ou d'archicad.

La difficulté est de bien choisir quel langage de programmation à utiliser, connaître toutes les procédures ainsi que leurs arguments et de faire le lien avec le processeur choisi en éléments finis.

Ce que donne autocad de plus est la possibilité de digitaliser un schéma de montage à partir d'une photo et d'insérer à l'échelle réelle, ce schéma directement en model réel ainsi le choix se porte sur autocad.

III-3.3 Choix du langage de programmation:

Pour le processeur qui est Castem, C'est un langage indépendant 'le langage gibiane'. En faite ce n'est pas un langage de programmation mais une suite d'instructions qui peuvent être typées et structurées en procédures.

Pour le préprocesseur qui est autocad, l'automation peut se faire de bien différents langages en fonction des ressources (machine de calcul, temps d'exécution souhaité, temps de développement accordé, et nombre de développeurs associés au projet) : en résumé il existe pour autocad : le visual basic, le visual lisp, l'Objectarx et le .Net

III-3.3.i) Le Visual basic :

Langage, comme son nom l'indique très basique. Incorporé sous forme de macros, il présente de grands défauts dans les piles nuls ce qui lui crée de grandes instabilités. En plus pour des entités graphiques identiques, il est difficile de créer des itérateurs faisant office de boucles liées.

III-3.3.ii) Le Visual lisp :

Langage très difficile à manier en orienté objet. Utilisé en informatique pour résoudre des problèmes d'intelligence artificielle. L'avantage de l'utiliser sur autocad est sa capacité appelé des entités graphiques répondant à un certain critère (filtre d'entités) en plus son aptitude à manier des dictionnaires internes en fichiers.

III-3.3.iii) l'Objectarx :

L'arx (=Autocad Runtime eXtension) est le Langage de programmation sur autocad par excellence. Les instructions sont écrites en C++ et le compilateur imposé est le Visual C++. Ce qui est difficile avec l'arx ce sont les modes d'ouvertures d'entités graphiques (open for Read ou open for write) et il ne pardonne aucune erreur en plus il faut beaucoup de lignes de codes pour créer des instructions par rapport au Visual lisp. La création des littérateurs est en

revanche plus aisée, en plus il nous donne la capacité de créer de nouvelles créatures (customized entities) en dérivant des créatures déjà définies sur autocad.

.Le model Object d'autocad est donné par la figure suivante :

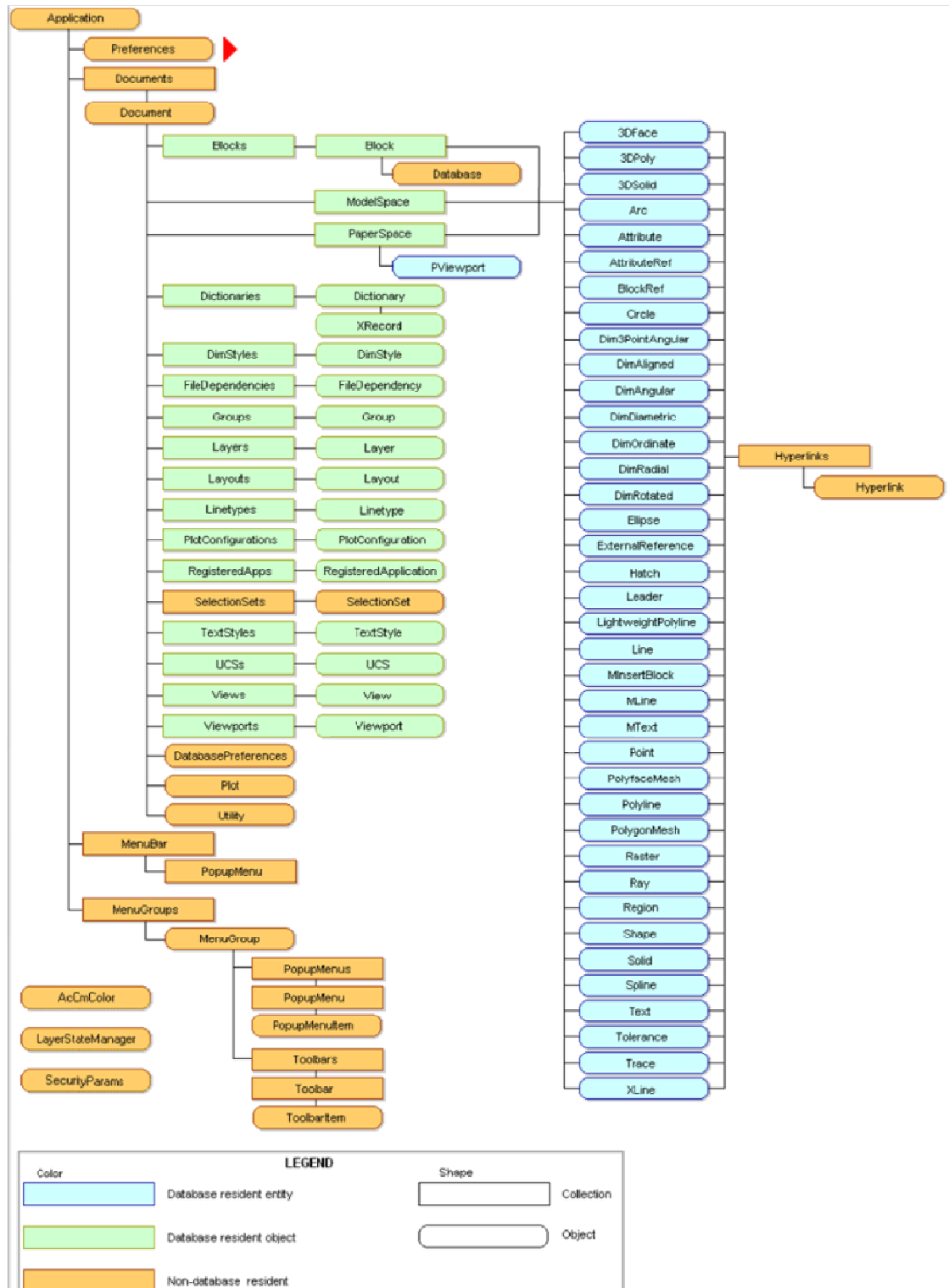


Figure III- 3 : model Activex-Object Autocad

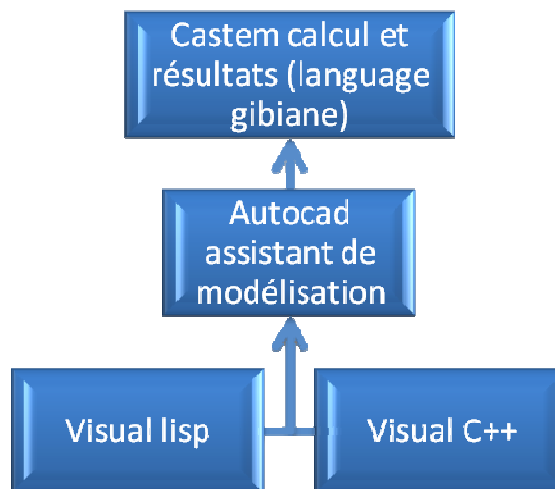
III-3.3.iv) Le .Net :

Le .Net est une technologie récente par rapport aux langages cités précédemment. Comparé au langage C crée dans les années soixante ou au lisp ou fortran créés aux années cinquante ; la création du .Net n'a eu lieu chez Windows qu'en 2002. L'écriture des codes se fait par le biais d'un langage dit le C# et il donne la possibilité d'utiliser le langage que nous souhaitons, l'inconvénient du C# est la difficulté de tracer les erreurs et le débogage en temps réel.

Ainsi le programme développé sur autocad est un Mix du Visual C++ (Objectarx) et du Visual lisp, qui eux pilotent le langage de castem (gibiane).

III-3.4 Comportement global du programme :

Le model de comportement du programme est le suivant:



III-3.5 Les dictionnaires sur autocad :

Afin de vérifier si une routine précédente (nécessaire) est effectuée ou non, le code doit laisser des marqueurs (dire que cette routine est déjà effectuée). Autocad donne la possibilité

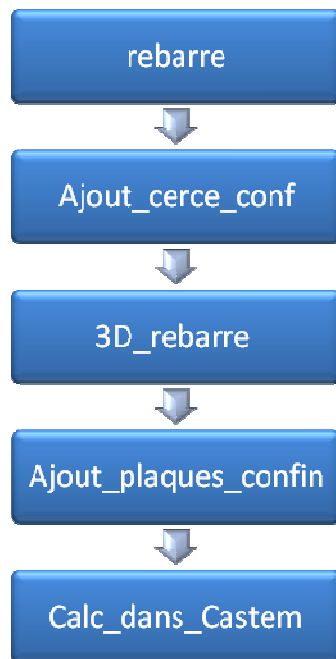
de stocker des informations non graphiques grâce aux dictionnaires. Cet atout est utilisé pour dire que telle ou telle routine a été déjà utilisée ou pas encore.

III-3.6 Les itérateurs sur autocad :

En vu global du code de calcul lisp, la majeure partie des taches travaillent grâce à des boucles sur des entités géométriques. Écrire un code qui à force d'en rajouter et d'enrichir devient très difficile à maintenir est très gênant pour un développeur, la solution est d'écrire des itérateurs en C++ sur les entités géométriques utilisées. Ainsi au lieu d'avoir une boucle à conditionnelle (while do) ou une boucle à répétition imposée (for i = j...), nous faisons passer la fonction voulue à répéter en argument dans cet itérateur.

III-4 PRINCIPALES ROUTINES DE L'APPLICATION :

Le programme n'a pas la vocation de travailler de manière itinérante du début jusqu'à la fin (entrée de données->traitement->résultat), mais de manière séquentielle en utilisant le principe des lignes de commandes d'autocad. Ce principe est intéressant étant donné qu'il donne une flexibilité d'utilisation par l'utilisateur final. Elles sont énumérées selon leur ordre chronologique de phasage.



III-4.1 La Routine rebarre :

C'est la routine qui nous permet de créer le montage expérimental standard ; poutre ferrailée avec une barre filante simplement appuyée et chargée en deux points. L'application s'occupe de tout (des schémas des appuis, points de charge, le coffrage, la création des calques...), il n'est demandé à l'utilisateur que la saisie du diamètre des barres.

Le dessin apparaît instantanément à l'échelle en 3D.

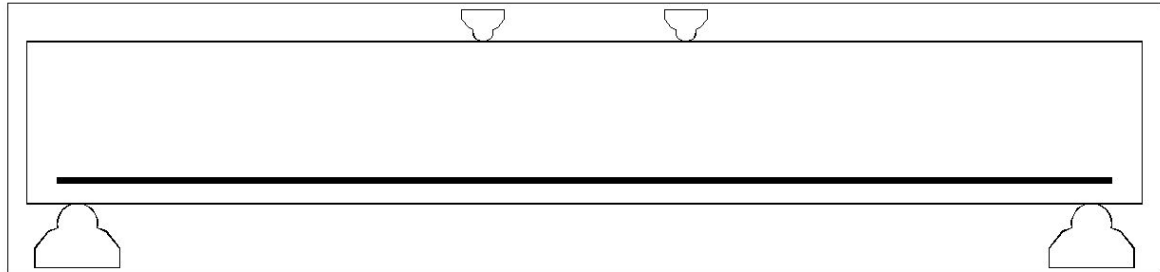
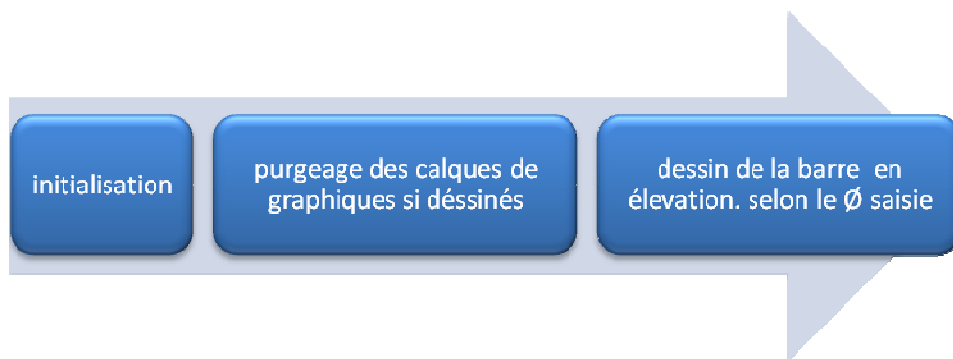


Figure III- 4 : résultat de la routine rebarre

Cette routine est représentée par l'algorithme si dessous :



III-4.1.i) La routine initialisation :

Si c'est pour la première fois que l'utilisateur commence son model sur un fichier vierge, le programme lance la cette fonction pour dessiner le coffrage (Béton), les conditions d'appui et le chargement (condition limites).

III-4.1.ii) Le dessin de la barre en élévation :

A partir de l'information de diamètre de barre saisie par l'utilisateur, une barre est dessinée à l'échelle réelle selon son $\varnothing$.

III-4.2 La Routine Ajout_cerce_conf:

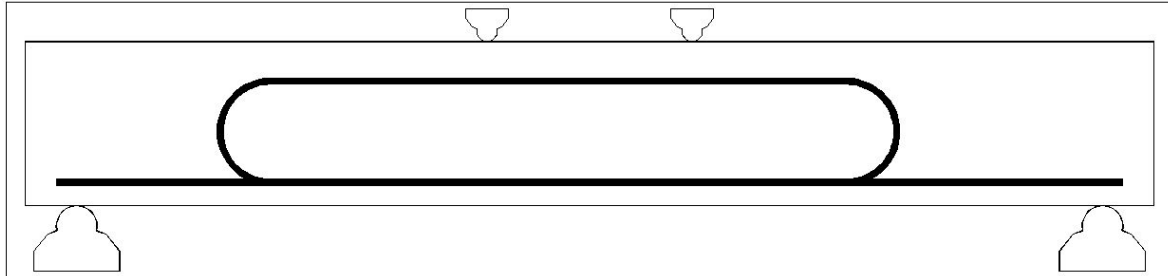
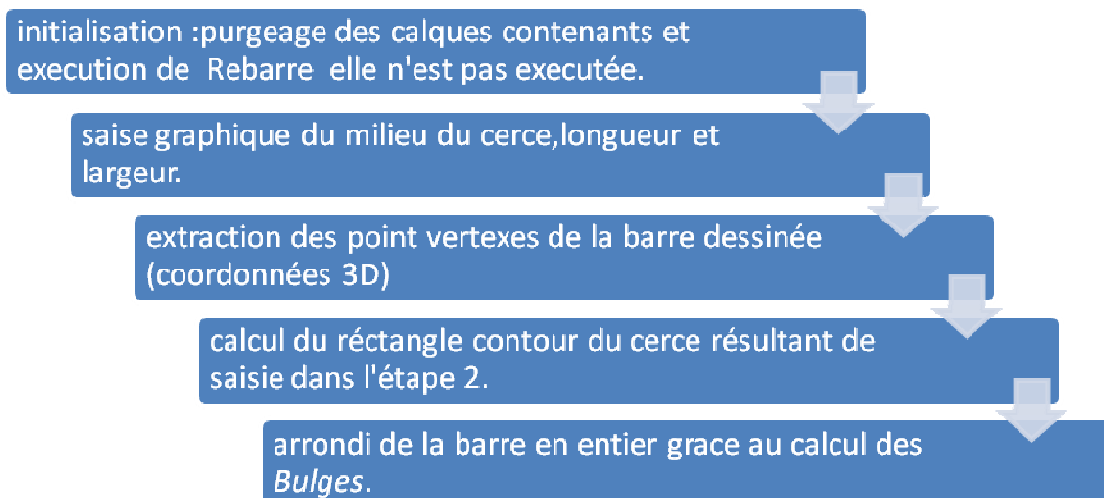


Figure III- 5 : résultat de la routine Ajout_cerce_conf

Cette routine ajoute autant de cerces de confinement qu'il en faudra. Toutes les configurations géométriques sont permises (intersections des cerces, cerces imbriqués...).

Cette routine est représentée par l'algorithme si dessous :



III-4.2.i) L'arrondi des barres :

Pour faire l'arrondi des barres l'astuce dans l'étape 4 est de prendre les points de brisure de la barre (segments), d'en rajouter les points calculés à partir de l'étape 2 (saisie) selon leur ordre en coordonnées curvilignes sur la barre et d'imposer le bulge à 1 pour les segments de droite perpendiculaires à l'axe neutre de la poutre (fig. 5).

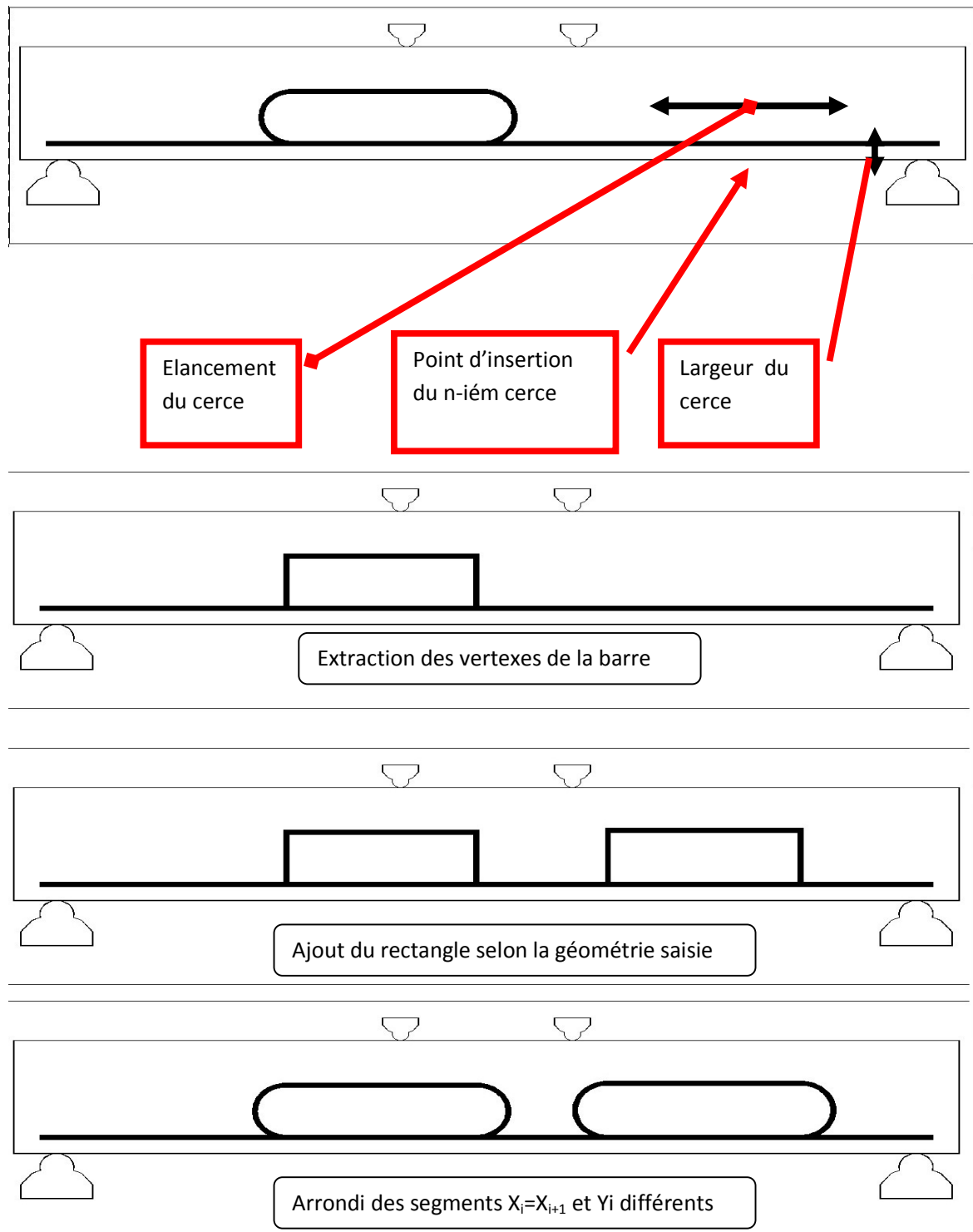


Figure III- 6 : débogage de la routine `Ajout_cerce_conf`

III-4.2.ii) Calcul des bulges :

Les formules utilisées dans la procédure qui fait l'arrondi de la barre et qui fait le bulge =1 sont explicitées dans le formulaire ci dessous. Il est aisé de remarquer qu'imposer un bulge du segment égal à 1 facilite grandement le travail d'arrondi sans regarder les rapports des angles inscrits et les rayons et sans se soucier des sens de mesures d'angles (trigonométrique ou horaire). Le formulaire suivant explicite la procédure la procédure Setbulge utilisée dans le programme.

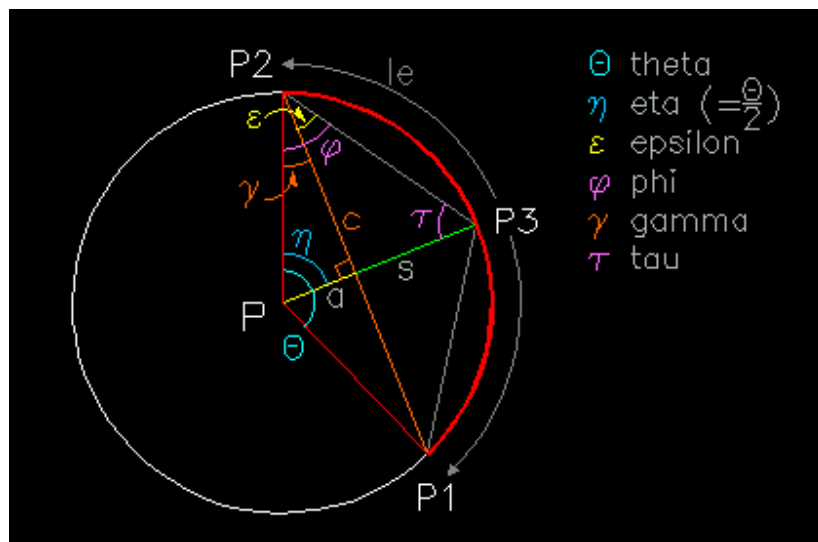


Figure III- 7 :illustration du Calcul du Bulge

```

θ = (* 4.0 (atan bulge))
η = (/ θ 2.0)
φ = (+ γ ε)
= (- (/ pi 2.0) (/ θ 4.0))
= (/ (- (* pi 2.0) θ) 4.0)
= (- (/ pi 2.0) (atan bulge))
γ = (/ (- pi θ) 2.0)
= (- (/ pi 2.0) (* 2.0 (atan bulge)))
= (atan (/ a c))
ε = (/ θ 4.0)
= (atan bulge)
= (atan (/ s c))
c = (distance p1 p2)
    
```

```

= (* 2.0 r (cos γ))
= (* 2.0 r (sin (/ θ 2.0)))
s = (* (/ c 2.0) bulge)
a = (sqrt (- (expt r 2.0) (expt (/ c 2.0) 2.0)))
(* r (cos η))
r = (/ (+ (expt (/ c 2.0) 2.0) (expt s 2.0)) (* 2.0 s))
= (/ s (* 2.0 (sin ε) (cos φ)))
= (/ a (cos η))

```

III-4.3 La Routine 3D_rebarre :

Cette routine ajoute la troisième dimension à la barre. En fait, le retour de la barre sur elle-même pour fermer la cerce de confinement doit éviter l'interférence du matériau acier. Les figures 7a et 7b montrent selon l'ordre, les cas d'utilisation et de non utilisation de 3D_rebarre :

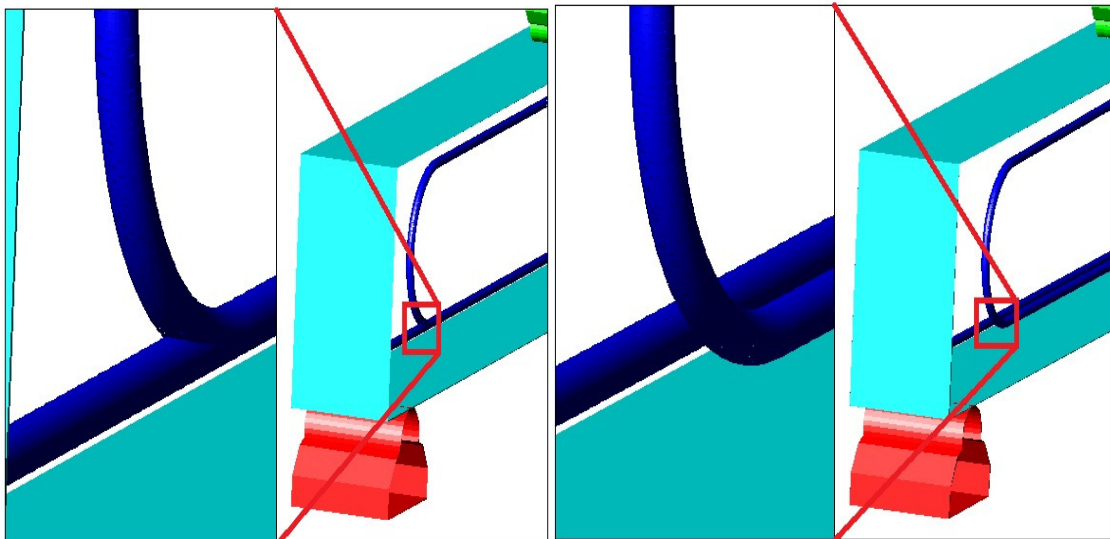


Figure III- 8 : résultat de la routine 3D_rebarre

L'algorithme de la procédure est le suivant :

initialisation :purgeage des calques contenant et execution de Rebarre elle n'est pas executée.

siasie par l'utilisateur de la longueur des micro-segments des barres

clacul sans dessin de la vue en haut de la barre si $X_{i+1} < X_i$, décaler les vertexes selon Z ainsi la 3D est crée.

calcul des coordonnées 3D de chaque point des micro-segments des

dessin sur l'écran des cylindres de base =Phi et de hauteur =longueur des micro-segments.

La longueur des micro-segments revient au choix de l'utilisateur. Cette taille inversement proportionnelle au temps de calcul.

La figure suivante donne une illustration de cas en variant la longueur des micro-segments.

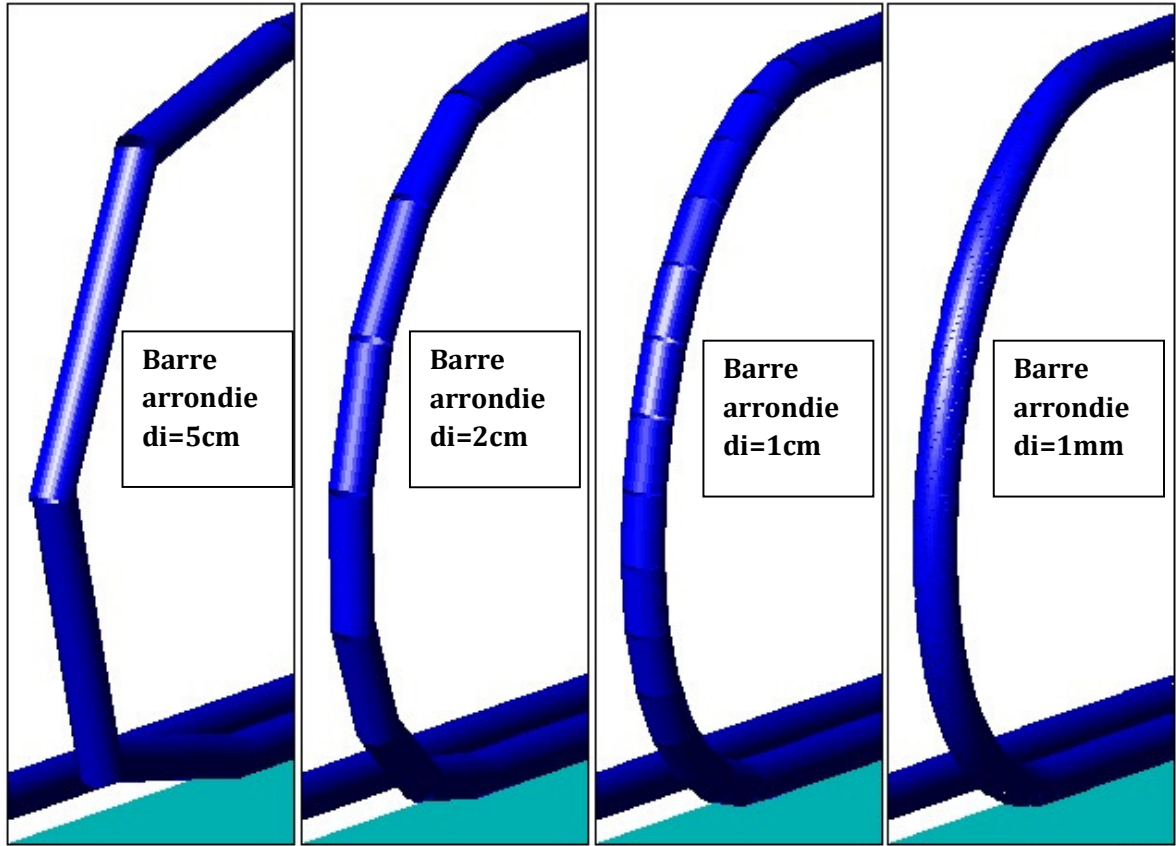


Figure III- 9 : différence du pas de maillage de en déroulant la routine 3D_rebarre

Le dessin des petits cylindres en coordonnées sur la barres est le résultat de transformation de géométrie d'un cylindre de base =Phi et de hauteur=longueur des micro-segments, orienté selon Z. par la formule matricielle de passage.

$$X = AX_0 + B = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = [R_x(\psi).R_y(\theta).R_z(\phi)]. \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

$$[R_x(\psi).R_y(\theta).R_z(\phi)] = \begin{bmatrix} \cos\theta.\cos\psi & -\cos\theta.\sin\psi + \sin\phi.\sin\theta.\cos\psi & \sin\phi.\sin\psi + \cos\phi.\sin\theta.\cos\psi \\ \cos\theta.\sin\psi & \cos\theta.\cos\psi + \sin\phi.\sin\theta.\cos\psi & -\sin\phi.\cos\psi + \cos\phi.\sin\theta.\cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi.\cos\theta & \cos\phi.\cos\theta \end{bmatrix}$$

B : est la vectrice translation du micro segment.

A : matrice de transformation 3D (rotation et mise à échelle du micro segment.)

III-4.4 La Routine Ajout_plaques_de confinement:

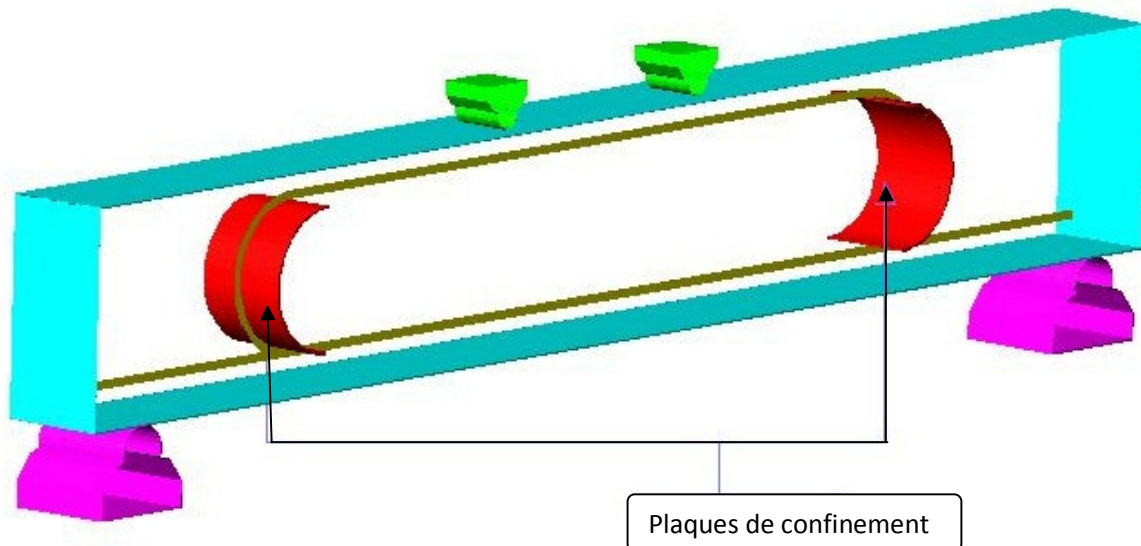


Figure III- 10 : ajout de plaques de confinement Ajout_plaques_confin

Cette routine ajoute des demi-tubes en acier au montage expérimental. Le but est d'avoir une plus grande section comprimée mobilisée pour le confinement du béton. L'algorithme de la routine est le suivant :

initialisation :purgeage des calques contenant et execution de Rebarre elle n'est pas executée.

extraction des point vertexes de la barre dessinée (coordonnées 2D)

calcul des coordonnées des *tous les segments* pouvant avoir des plaques de confinement .

boucle de calcul des arrondi de la des plaques grace au calcul des *Bulges*.

III-4.5 La Routine Calc_dans_Castem:

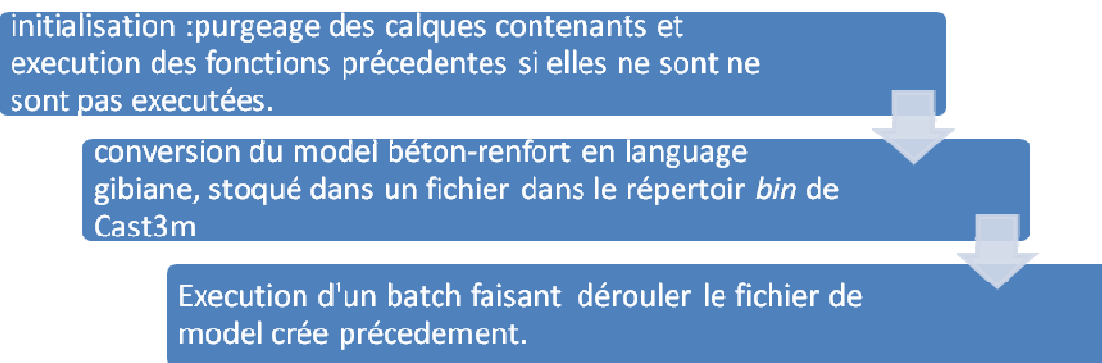
Cette routine convertit le model en données pour castem et y fait le calcul. Une fois lancée, la forme-consol de Cast3m apparait sur l'écran.

```

* Spm304=Spm304 et<blc_p6 -0.3046 0.1102 0.0 0.8687 >;
* vam304=coul rouge <volu Scm304 'TRAN'<0.001 0.0 0.0>>;va= va et vam304;
* vbm304=coul bleu <volu Spm304 'TRAN'<0.001 0.0 0.0>>;vb= vb et vbm304;
* Scm303=<blc_c6 -0.3036 0.023 0.0 1 >;
* Scm303=Spm303 et<blc_c6 -0.3036 0.0265 0.0 0.851 >;
* Scm303=Spm303 et<blc_c6 -0.3036 0.1106 0.0 0.851 >;
* Spm303=<blc_p10 -0.3036 0.01 0.0 2 >;
* Spm303=Spm303 et<blc_p10 -0.3036 0.0686 0.0 7.8976 >;
* Spm303=Spm303 et<blc_p10 -0.3036 0.1366 0.0 4.6844 >;
* Spm303=Spm303 et<blc_p6 -0.3036 0.023 0.0 1 >;
* Spm303=Spm303 et<blc_p6 -0.3036 0.0265 0.0 0.851 >;
* Spm303=Spm303 et<blc_p6 -0.3036 0.1106 0.0 0.851 >;
* vam303=coul rouge <volu Scm303 'TRAN'<0.001 0.0 0.0>>;va= va et vam303;
* vbm303=coul bleu <volu Spm303 'TRAN'<0.001 0.0 0.0>>;vb= vb et vbm303;
* Scm302=<blc_c6 -0.3026 0.023 0.0 1 >;
* Scm302=Spm302 et<blc_c6 -0.3026 0.0261 0.0 0.8342 >;
* Scm302=Spm302 et<blc_c6 -0.3026 0.111 0.0 0.8342 >;
* Spm302=<blc_p10 -0.3026 0.01 0.0 2 >;
* Spm302=Spm302 et<blc_p10 -0.3026 0.0686 0.0 7.9885 >;
* Spm302=Spm302 et<blc_p10 -0.3026 0.1368 0.0 4.6491 >;
* Spm302=Spm302 et<blc_p6 -0.3026 0.023 0.0 1 >;
* Spm302=Spm302 et<blc_p6 -0.3026 0.0261 0.0 0.8342 >;
* Spm302=Spm302 et<blc_p6 -0.3026 0.111 0.0 0.8342 >;
* vam302=coul rouge <volu Scm302 'TRAN'<0.001 0.0 0.0>>;va= va et vam302;
  
```

Figure III- 11 : Exécution de Castem

L'algorithme de cette routine est le suivant :



III-5 LA CONVERSION D'INFORMATION AUTOCAD VERS CASTEM:

Le logiciel de calcul CAST3M ne dispose pas d'interface directe avec des logiciels de dessin, la philosophie de CAST3M est d'offrir un système complet, intégrant non seulement les fonctions de calcul, mais également les fonctions de construction des modèles et les fonctions

de post-traitement. Cependant, l'utilisation du modeleur de CAST3M nécessite une construction géométrique «à la main», lorsque les objets à construire ne sont pas de forme régulière comme cylindrique, sphérique etc. La construction en 3D peut devenir très vite un casse-tête. La philosophie de l'architecture de CAST3M s'explique lorsque l'on aborde des projets de recherche dont la durée d'élaboration est souvent assez longue et que plutôt que de modéliser toutes les pièces très compliquées, on réfléchit d'avantage à la simplification du modèle. De plus, elle date des années 80, où les logiciels de dessin n'avaient rien de comparable à ceux d'aujourd'hui. Mais à l'heure actuelle, se priver de l'assistance des outils de CAO comme autocad peut être très dommageable dans certains cas, car les récents progrès en informatique ont permis à ces logiciels d'augmenter considérablement leur performance.

Le schéma de montage expérimental est fait sur autocad 3D par le programme, il est actualisable à chaque saisie. Il reste maintenant sa conversion vers Castem. Le but est d'arriver à créer un maillage volumique 3D qui fait office de béton, y laisser à l'intérieur des réservations pour l'acier et les plaques de confinement.

La complexité du problème géométrique est due à la forme amorphe de l'acier et généralement dans castem, les configurations géométriques qui peuvent facilement être modélisées sont des extrusions de surfaces ou des révolutions.

L'idée est de créer une passerelle autocad-Castem qui peut être utilisée pour tout types de projets quelque soit sa complexité.

Sur autocad l'entité géométrique équivalente aux maillages volumiques est le Solide3D. Il permet toutes les opérations (intersection, union et soustraction) et notre problème s'y adapte parfaitement.

III-5.1 Création de cavités dans castem :

L'idée de base est de convertir directement le béton en maillage massif et le renfort en un autre maillage. Le problème dans cette démarche est qu'il y a un volume d'interférence renfort béton à éliminer et dans castem . soustraire un maillage volumique d'un autre, ne peut pas se faire.

III-5.2 Extrusion de coupes transversales du composite béton renfort :

Cette option est bonne si elle fonctionnait tout le temps. En fait pour le cas illustré dans la figure11. Voulant créer la surface rectangulaire en blanc pour les 2 cas ; rectangle troué à surface quelconque, le cas gauche passe or celui de droite ne passe pas. Ce problème n'est ni documenté ni explicité nul part. C'est lié à une certaine convexité du trou donc ce cas peut ne pas se faire.

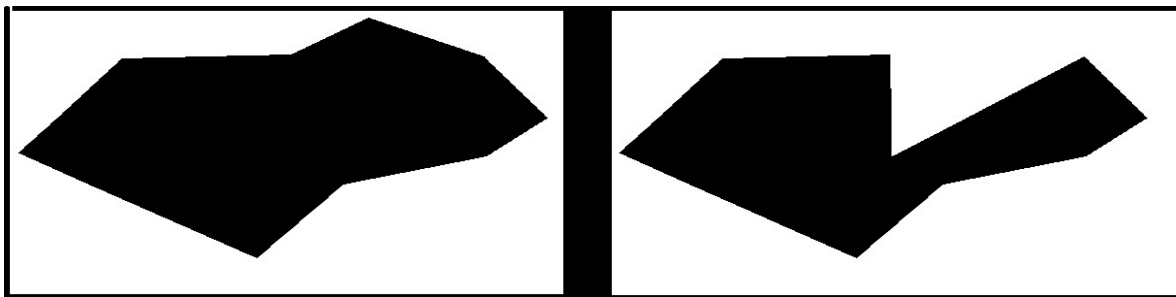


Figure III- 12 : problème de convexité de Castem

III-5.3 Extrusion de demi-coupes transversales du composite béton renfort :

A condition d'y respecter les densités relatives des maillages, il est possible d'extruder des demi-coupes pour créer un assemblage du montage expérimental.

III-5.4 Calcul mathématique des coupes pour création du maillage :

Il en résulte 3 types de coupes (figure 12) :

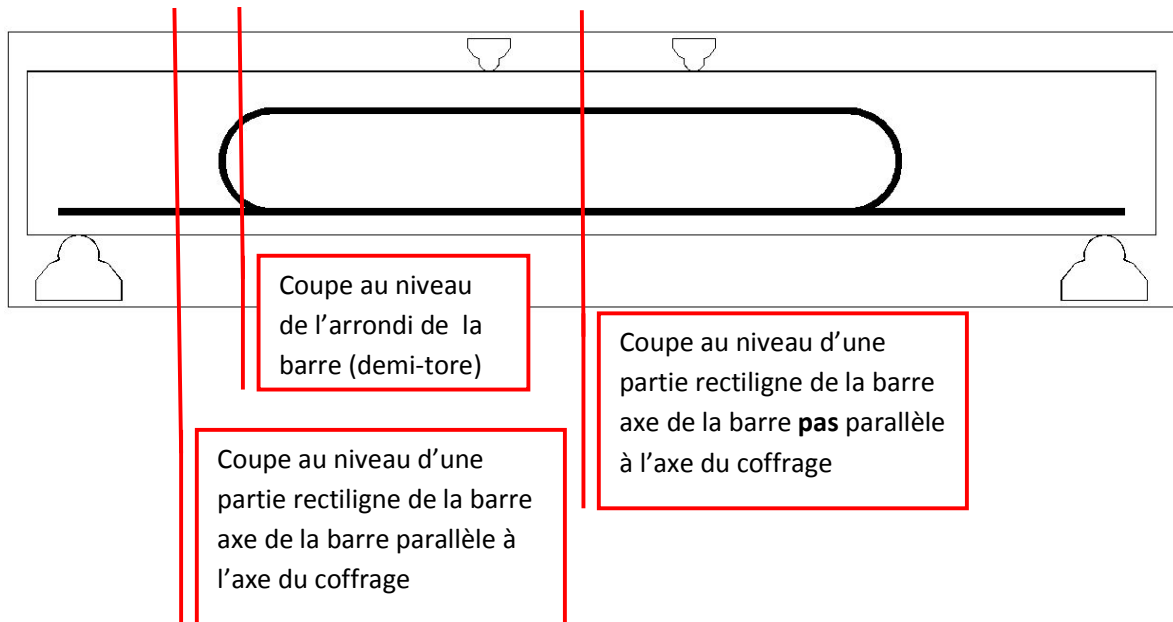


Figure III- 13 : différentes de coupes possibles selon les cas

Donc mathématiquement le programme doit calculer l'intersection de :

- Un cylindre et un plan ayant la même normale=>section circulaire.
- Un cylindre et un plan ayant une normale différente=>section elliptique.
- Un tore et un plan=>section spirique (le développement et formules utilisées dans le programme sont en annexe 1).

III-5.5 La Procédure scan_solide_3D :

Cette procédure permet la conversion de solide3D en coupes qui seront elles aussi converties en surfaces dans Castem. Elle est écrite en langage Hybride lisp/C++ car l'itérateur

sur les solides3D en sous entités n'est pas permis en lisp, (en fait il y a une différence dans la profondeur de ce qui est permis à chaque langage et le C++ est beaucoup plus profond que lisp).

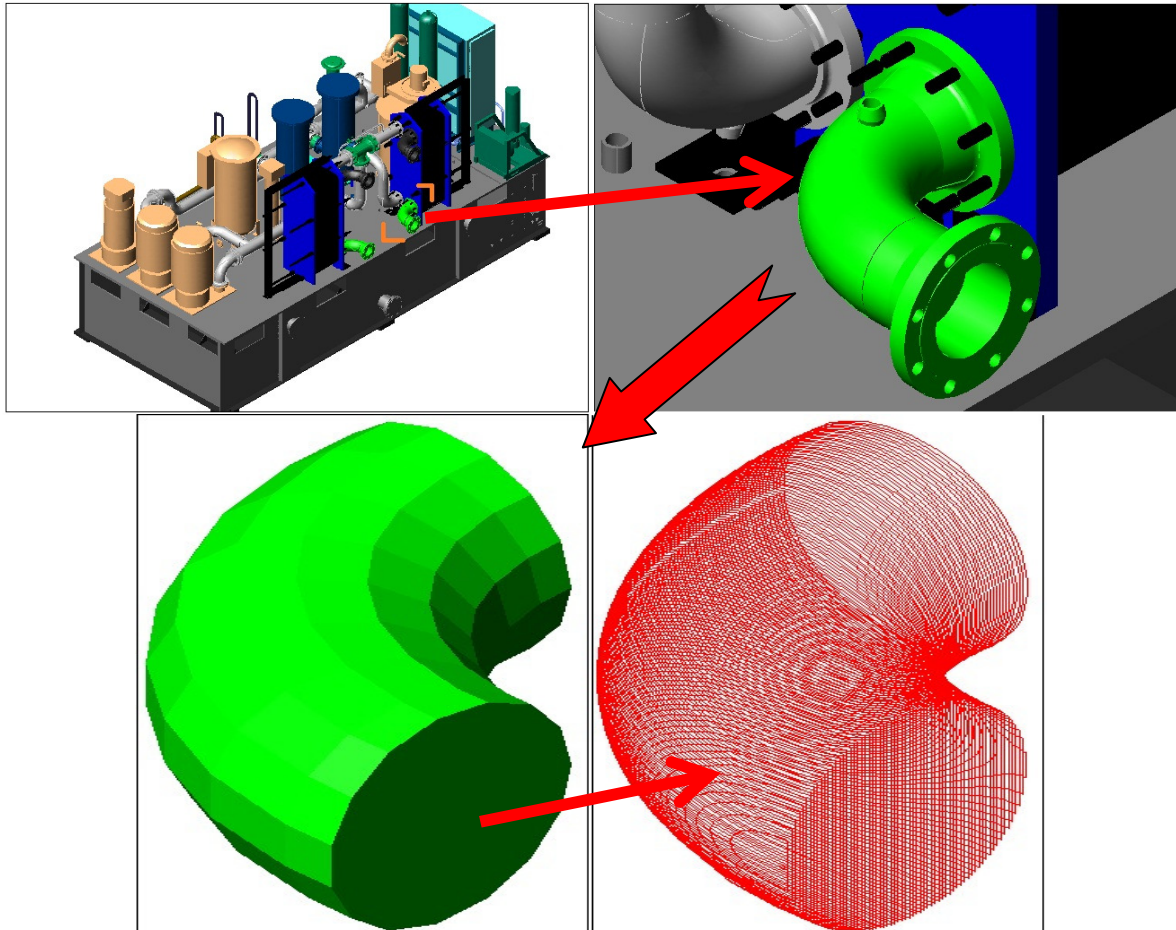


Figure III- 14 : procédure de travail du convertisseur

Cette procédure est le deuxième cheval de bataille de ce travail. Car vu les limitations existantes dans le mailleur de Castem (pas de cavités, problème de convexité des trous...), convertir un solide3D en coupes élémentaires et les convertir en surfaces dans castem pour en créer le volume correspondant reste l'ultime solution.

Ce qui est bien dans cette procédure est la possibilité de sa réutilisation même pour d'autres problèmes de la mécanique pour convertir des solides 3D vers Castem . Dans la figure13 s'illustre le cas de débogage de l'application en utilisant en exemple une conduite d'un Oïl Module.

III-5.6 Autres utilisation du module convertisseur :

Le développement des nouvelles technologies d'acquisition des données numérisées des reliefs des structures nous permet aujourd'hui de recevoir tout en numérique toute configuration géométrique de structure en model réel ou model réduit (génie civil, mécanique...).

Un de ces produits qui pourra être utilisé est le handyscan de creafom3d fig15 :



Figure III- 15 : illustration du *handyscan*

Les sorties de handyscan sont des fichiers autocad du maillage de la structure à analyser en entité Solide3D. Et la conversion via ce convertisseur est directe vers Cas3em.

III-6 LE MODEL ET SON ANALYSE DANS CAST3M:

Le modèle de calcul représente l'ensemble des données que doit préparer l'utilisateur pour décrire les caractéristiques complètes du problème à analyser. Il peut être décrit par le schéma suivant :

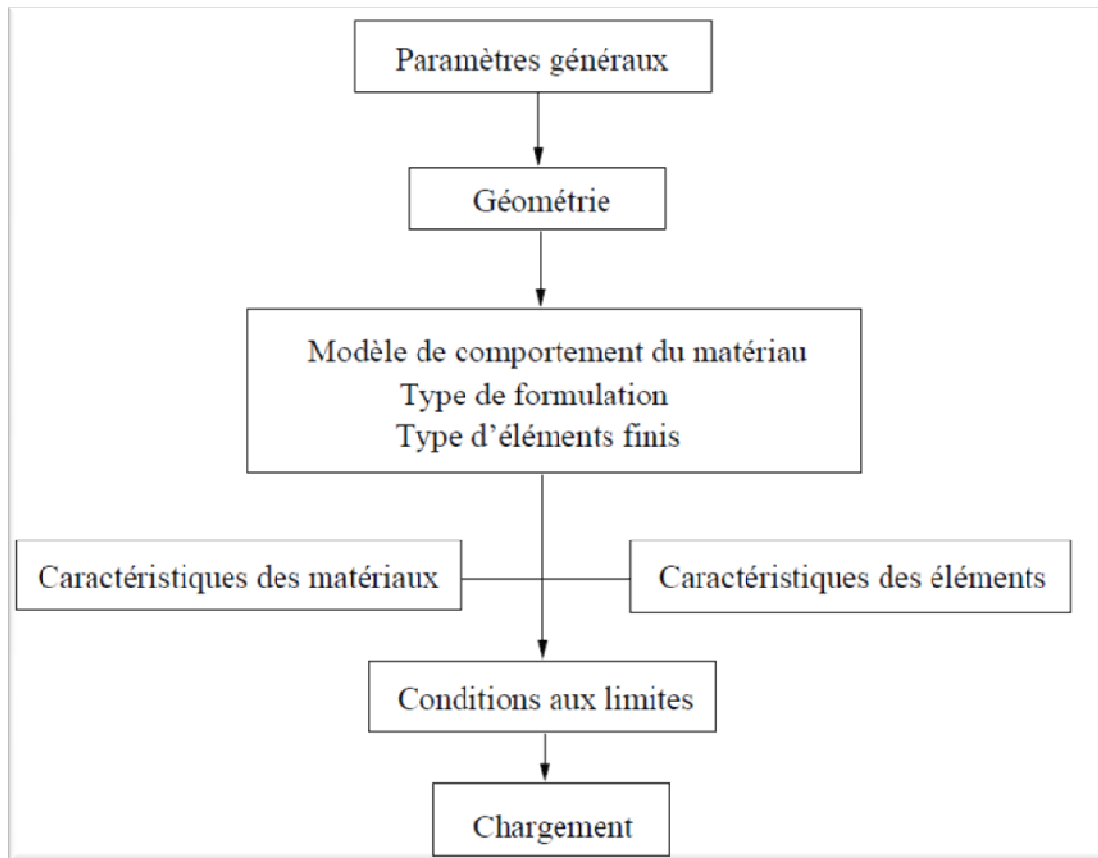


Figure III- 16 : succession des tâches de Castem

- Les paramètres généraux sont définis avec la directive OPTI.
- La géométrie représente la forme discrétisée du domaine à étudier. Elle est composée d'objets de type MAILLAGE.
- Le modèle associe au maillage une loi de comportement du matériau, la formulation éléments finis ainsi que le type d'éléments utilisés. C'est un objet de type MMODEL.
- Les caractéristiques des matériaux définissent les propriétés physiques des matériaux : module deYoung, coefficient de Poisson, masse volumique, etc. Ces données sont rassemblées dans un objet de type MCHAML à plusieurs composantes (YOUN, NU, RHO...).
- Les caractéristiques des éléments sont relatives à certaines données supplémentaires selon les types d'éléments choisis qui ne peuvent se déduire de la géométrie. Par

exemple, pour les coques il est nécessaire d'indiquer leur épaisseur, pour les poutres leur section et leurs différentes inerties. Ces données sont rassemblées dans un objet de type MCHAML à plusieurs composantes (SECT, INRY, EPAI, TORS...). Ce champ peut être concaténé avec le champ de caractéristiques des matériaux.

- Les conditions limites de type blocage doivent s'ajouter à la matrice de rigidité. Ce sont des objets de type RIGIDITE. S'il s'agit de conditions imposées (température, déplacements...), elles doivent de plus s'ajouter au second membre de l'équation à résoudre. Ce sont des objets de type CHPOINT.
- Le chargement est un objet de type CHPOINT ou CHARGEMENT (dans le cas de description spatiale et temporelle).

III-6.1 Options générales :

Les options générales de calcul sont déclarées avec la directive OPTI. Cette directive permet de déclarer les principaux paramètres du calcul. Elle se place généralement en début de programme. Elle est suivie d'un mot-clé qui spécifie l'option choisie, en particulier la dimension de l'espace, le type d'éléments utilisés, le type de calcul (contraintes planes, axisymétrique, Fourier, tridimensionnel...), etc.

```
opti echo 1;  
  
opti trace open elem cub8 ;
```

Dans notre cas les options comme figuré sont :

- ECHO 1 : toutes les données apparaissent en sortie.
- TRACE open : tracé des graphiques 3D en utilisant la bibliothèque de la librairie dynamique (dll) nommée « glut32.dll ».
- dime 3: calcul et tracé en 3D.
- elem cub8 : On travaille en trois dimensions en utilisant des éléments CUB8. En fait, l'option ELEM permet de définir la classe d'éléments (linéaires ou quadratiques) en donnant l'élément de niveau le plus complexe. Ainsi CUB8 autorise aussi les éléments

POI1, SEG2, TRI3, QUA4, TET4, PYR5 et PRI6. La définition de CUB8 en début de fichier évite de préciser à chaque étape (lignes, surfaces et volume) le nouveau type d'éléments.

III-6.2 Opérateurs utilisée pour le maillage de surface :

III-6.2.i) Création de point :

Dans le présent projet les points sont créés principalement en définissant en 3D les coordonnées ex : $P_i = X_i Y_i Z_i$;

Dans certains cas on a eu recours à une procédure non définie dans les opérateurs de Cast3m pour chercher un point spécifique proche d'un maillage volumique volume donné en argument « FIND_NOD » citée ultérieurement.

III-6.2.ii) Création de ligne :

La création de lignes se fait de la manière ordinaire : $lig = D P_i P_{i+1}$;

III-6.2.iii) Création d'arc :

La création de lignes se fait de la manière ordinaire : $cer = C P_i P_{i+1}$;

III-6.2.iv) Création d'ellipse :

Bien que documentée, l'entité ellipse n'existe pas dans cast3m. Comme subterfuge nous imposons à un cercle une affinité sur le plan perpendiculaire à sa normale. Cette matrice affinité doit être dans le sens où nous voulons allonger ou aplatir notre cercle. C'est le concept mathématique de définition d'ellipse.

III-6.2.v) Création de surface :

L'opérateur utilisé pour la création de surface dans ce model est SURF. Cet opérateur construit une surface à partir d'un contour fermé. Les éléments utilisés sont ceux spécifiés dans la directive OPTI. On peut remarquer qu'avec les éléments QUA4, le mailleur automatique insère tout de même des éléments TRI3, le maillage obtenu n'est donc pas très satisfaisant. L'idéal sera de créer des surfaces avec la directive DALL mais la nécessité de travailler sur un contour comportant des lignes et des arcs donne à SURF l'avantage et elle utilisée dans le problème courant.

III-6.3 Opérateurs utilisée pour le maillage volumique :

Castem permet la création de maillages volumiques de diverses manières, pour notre model qui consiste en extrusion de surfaces « figure 15 », la directive utilisée est VOLU.

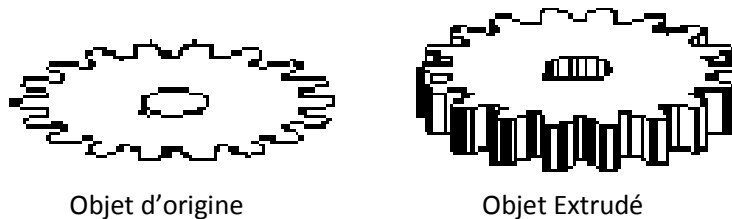


Figure III- 17 : Extrusion

III-6.4 Opérateurs auxiliaires :

La symétrie : se fait par le biais de la commande SYME , il construit le maillage et le CHPOINT résultants de la symétrie d'un maillage et d'un CHPOINT éventuellement associé.

L'affinité : se fait par le biais de la commande AFFI , réalise une affinité géométrique

Le déplacement : se fait par le biais de la commande DEPL, engendre le déplacement d'un maillage.

III-6.5 Opérateurs géométriques additionnel créés et utilisés:

Le convertisseur de maillage volumique ne travaille pas à base des objets prédéfinis dans cast3m car la définition de chaque coupe créerait la nécessité d'écrire beaucoup de lignes de commandes et l'astuce serait de créer des prototypes d'objets imbriqués ayants leurs méthodes.

Une subdivision de n'importe quelle coupe sous-coupes paramétrées aura pour résultat de minimiser le nombre de lignes de directives à calculer.

Le résonnement est schématisé dans la figure 18 :

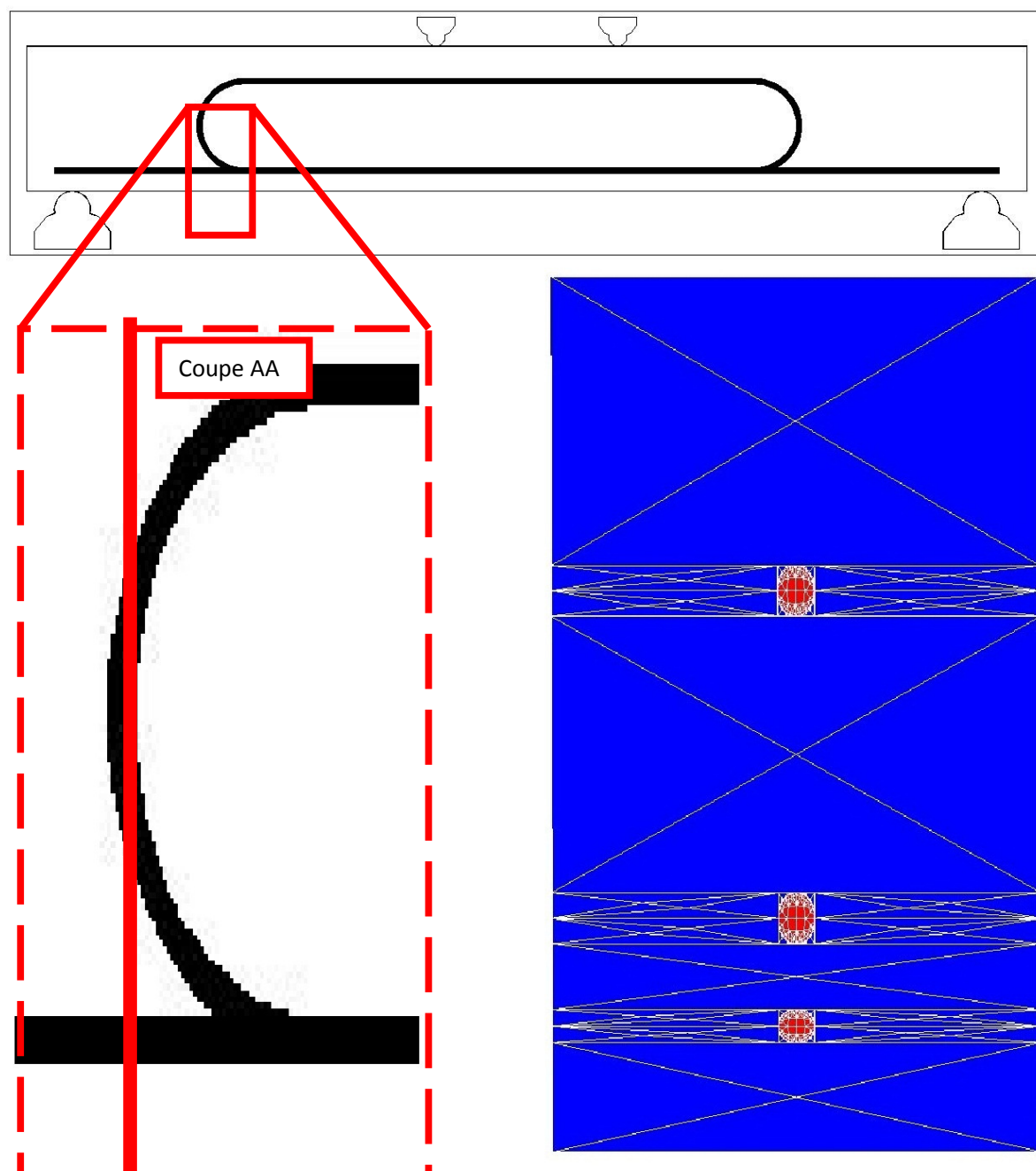


Figure III- 18 : schéma de coupe castem

La coupe de la figure 16 montre un rectangle bleu (la section du béton) perforé en 3 Points (sections de la barre d'acier).

Le prototypage est l'astuce d'avoir ces multiples composants de la coupe en Objets cast3m dont le nombre de paramètres géométriques sont minimisés au maximum, ainsi il en résultera une réduction significative de lignes de commandes et de temps de calcul. Figure 19 :

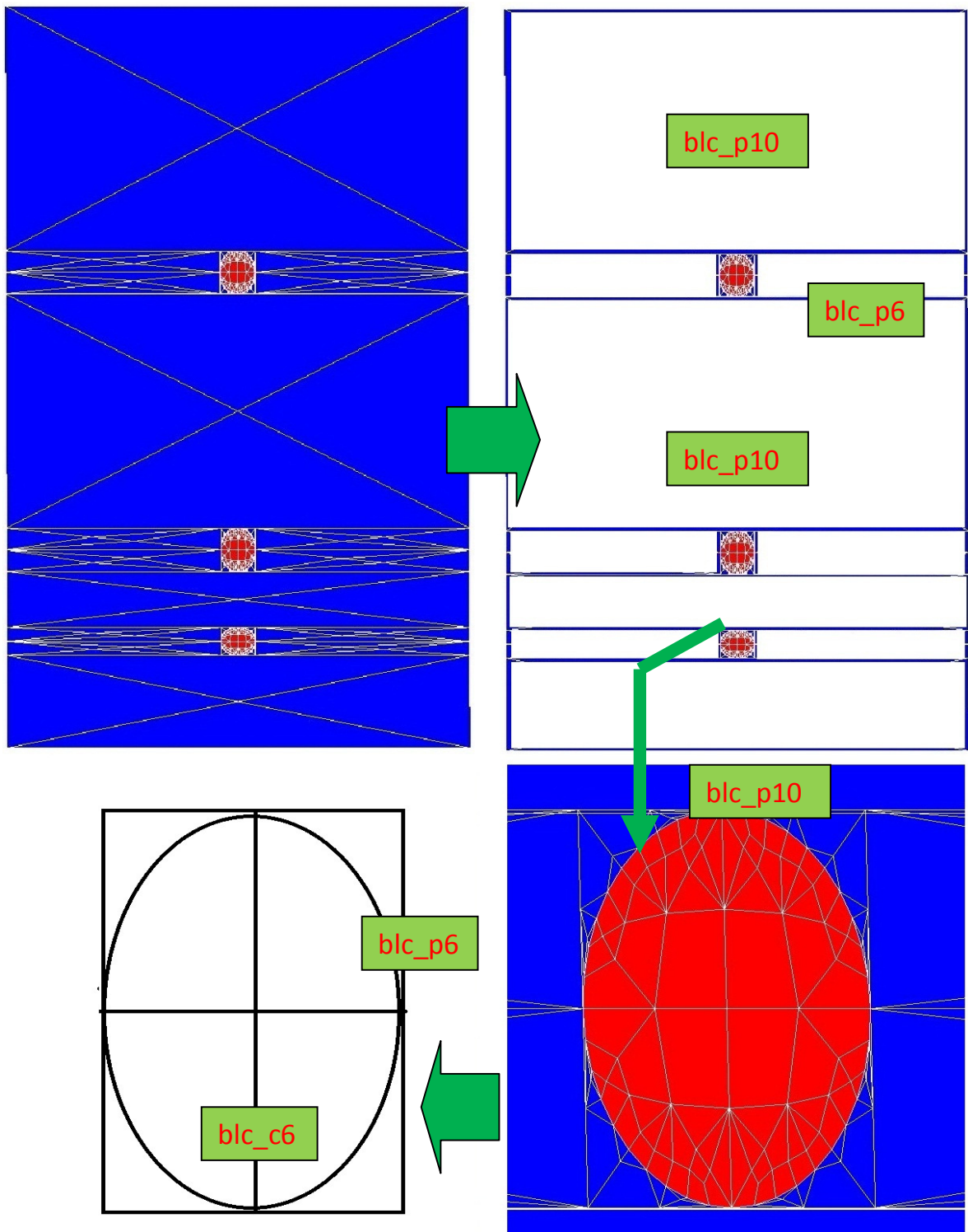


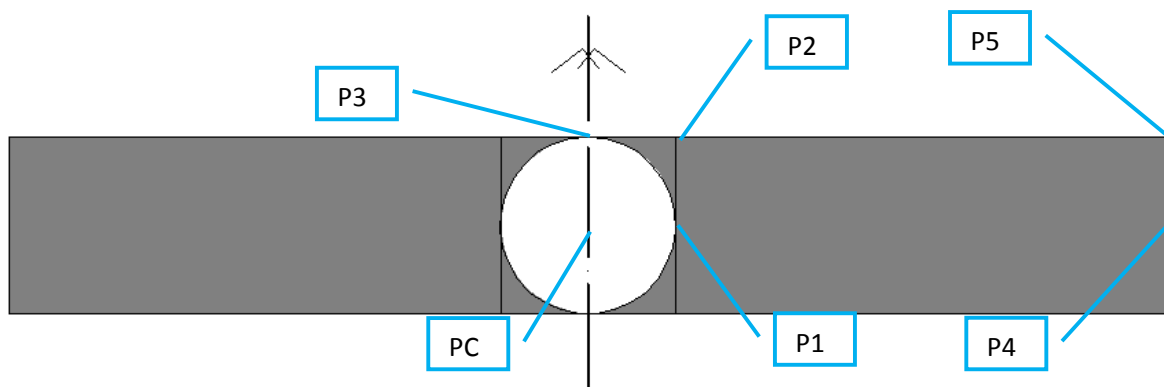
Figure III- 19 : partition d'une coupe pour Castem

Les prototypes utilisés dans le programme et dans cast3m sont comme illustrés dans la figure17. Le détail de chacun des prototypes et procédures associées, est donné selon leur ordre dans le fichier de sortie dgibi.

III-6.5.i) blc_p6 :

Ce prototype est une bande appartenant à la surface donnant le béton dont la base est égale à la largeur de la poutre et la hauteur est le diamètre de l'acier utilisé.

Schéma :



Code de Prototypage Cast3m :

```
DEBP blc_p6 Xc Yc Zc echelle*FLOTTANT ;
PC = Xc 0.0 Zc ;
*rayon des barres d'acier Phi6
Rayon= 0.003;
P1 = Xc 0.0 (Zc+Rayon) ;
P2 = Xc Rayon (Zc+Rayon) ;
P3 = Xc Rayon Zc ;
P4 = Xc 0.0 (Zc+0.04) ;
P5 = Xc Rayon (Zc+0.04) ;
RS = surf ((D 2 P1 P2 )et(D 2 P2 P3 )et(C 10 P1 PC P3)) 'PLANE';
Rect= surf ((D 1 P1 P4)et(D 1 P4 P5)et(D 1 P5 P2)et(D 1 P2 P1))
'PLANE';
RS= RS et Rect;
RS = RS et(syme RS 'DROIT' P1 Pc);
RS =RS et(syme RS 'DROIT' P3 PC);
RS = affi RS (0.0 0.0 0.0) (0.0 1.0 0.0) echelle;
FINP DEPL RS 'PLUS' (0.0 Yc 0.0) ;
```

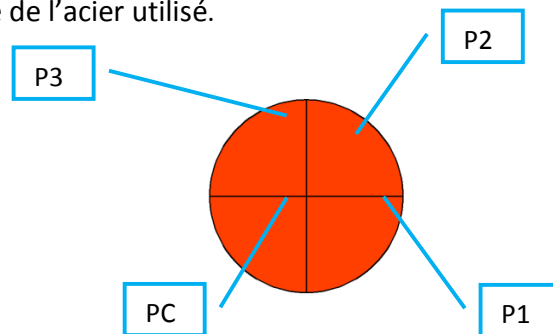
Explication :

Engendre en utilisant le principe de la Bi-symétrie, un rectangle évidé d'un cercle, et une bade allant jusqu'au bord de la poutre, cette procédure crée une sorte d'enveloppe de la barre d'acier. Dans le vide en blanc c'est exactement là que va s'insérer la barre (blc_c6).

III-6.5.ii) blc_c6 :

Ce prototype est un disque appartenant à la surface donnant l'acier dont le diamètre de la base est égal au diamètre de l'acier utilisé.

Schéma :



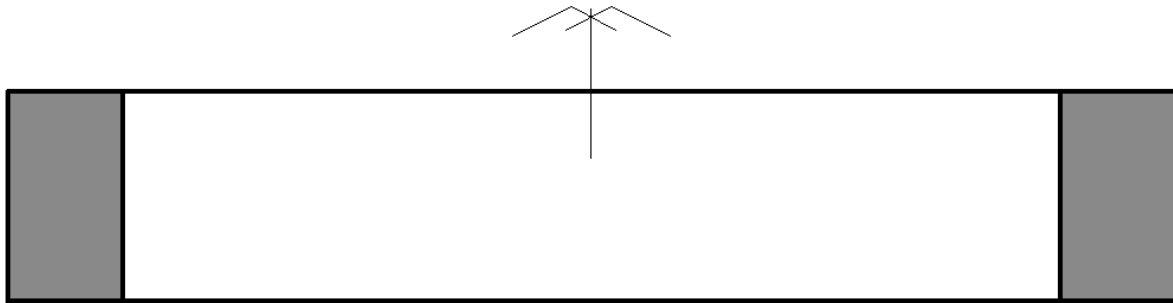
Code de Prototypage Cast3m :

```
DEBP blc_c6 Xc Yc Zc echelle*FLOTTANT ;
PC = Xc      0.0      Zc      ;
*rayon des barres d'acier Phi6
Rayon= 0.003;
P1 = Xc      0.0      (Zc+Rayon) ;
P2 = Xc      Rayon    (Zc+Rayon) ;
P3 = Xc      Rayon    Zc      ;
RS = surf ((D 2 PC P1 )et(C 10 P1 PC P3) et(D 2 P3 PC )) 'PLANE';
RS = RS et(syme RS 'DROIT' P1 Pc);
RS =RS et(syme RS 'DROIT' P3 PC);
RS = affi RS (0.0 0.0 0.0) (0.0 1.0 0.0) echelle;
FINP DEPL RS 'PLUS' (0.0 Yc 0.0) ;
```

Explication :

En utilisant le principe de la Bi-symétrie sur un quart de cercle, elle crée un Disque qui engendre localement l'acier. Ce disque est enveloppé avec le prototype béton : blc_p6

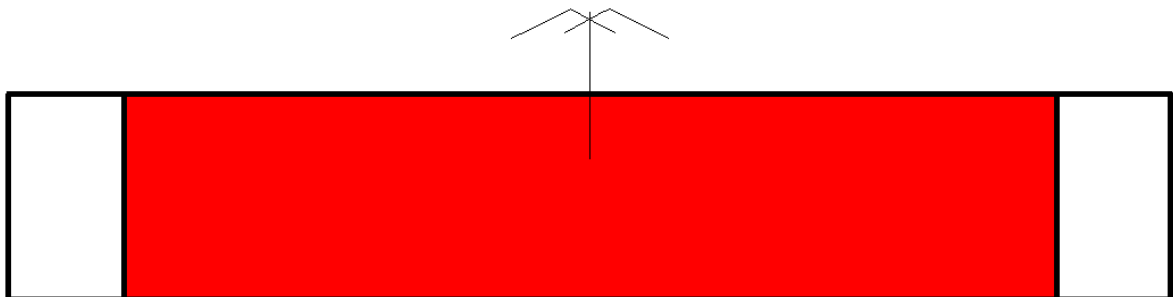
III-6.5.iii) blc_p2 :



Code de Prototypage Cast3m :

```
DEBP blc_p2 Xc Yc Zc echelle*FLOTTANT ;
PC   = Xc   0.0           Zc           ;
PSym = Xc   0.001         Zc           ;
*épaisseur des régidifs 0.002 vide 1cm
ep = 0.002 ;
demilarg =0.035;
P1  = Xc  0.001          (Zc+demilarg)   ;
P2  = Xc  0.001          (Zc+0.04)      ;
P3  = Xc -0.001          (Zc+0.04)      ;
P4  = Xc -0.001          (Zc+demilarg)   ;
RS= surf ((D 1 P1 P2)et(D 1 P2 P3)et(D 1 P3 P4)et(D 1 P4 P1))
'PLANE';
RS = RS et(syme RS 'DROIT' Pc PSym );
RS = affi RS (0.0 0.0 0.0) (0.0 1.0 0.0) echelle;
FINP DEPL RS 'PLUS' (0.0 Yc 0.0) ;
```

III-6.5.iv) blc_c2 :

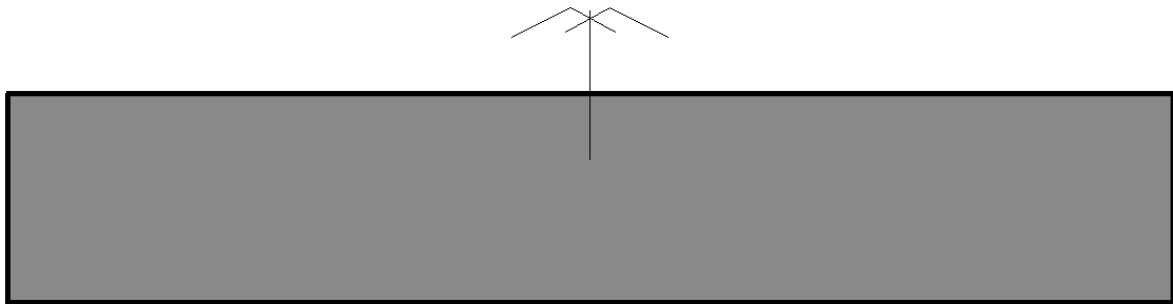


Code de Prototypage Cast3m :

```
DEBP blc_c2 Xc Yc Zc echelle*FLOTTANT ;
*bande de 1cm
P1  = Xc  0.001          (Zc+0.035)     ;
P2  = Xc  0.001          (Zc-0.035)     ;
P3  = Xc -0.001          (Zc-0.035)     ;
```

```
P4 = Xc -0.001 (Zc+0.035) ;
RS= surf ((D 1 P1 P2)et(D 1 P2 P3)et(D 1 P3 P4)et(D 1 P4 P1))
'PLANE';
RS= affi RS (0.0 0.0 0.0) (0.0 0.1 0.0) echelle;
FINP DEPL RS 'PLUS' (0.0 Yc 0.0);
```

III-6.5.v) blc_p10:



Code de Prototypage Cast3m :

```
DEBP blc_p10 Xc Yc Zc echelle*FLOTTANT ;
*bande de 1cm
P1 = Xc 0.005 (Zc+0.04) ;
P2 = Xc 0.005 (Zc-0.04) ;
P3 = Xc -0.005 (Zc-0.04) ;
P4 = Xc -0.005 (Zc+0.04) ;
RS= surf ((D 1 P1 P2)et(D 1 P2 P3)et(D 1 P3 P4)et(D 1 P4 P1))
'PLANE';
RS= affi RS (0.0 0.0 0.0) (0.0 0.1 0.0) echelle;
FINP DEPL RS 'PLUS' (0.0 Yc 0.0);
```

III-6.5.vi) blc_p160:

Code de Prototypage Cast3m :

```
DEBP blc_p160 densit*ENTIER Xc Yc Zc echelle*FLOTTANT ;
*bande de 16cm
P1 = Xc 0.08 (Zc+0.04) ;
P2 = Xc 0.08 (Zc-0.04) ;
P3 = Xc -0.08 (Zc-0.04) ;
P4 = Xc -0.08 (Zc+0.04) ;
RS= surf ((D densit P1 P2)et(D densit P2 P3)et(D densit P3 P4)et
(D densit P4 P1)) 'PLANE';
RS= affi RS (0.0 0.0 0.0) (0.0 0.1 0.0) echelle;
FINP DEPL RS 'PLUS' (0.0 Yc 0.0) ;
```

III-6.6 Opérateurs utilisée pour les paramètres mécaniques:

III-6.6.i) Modèle de comportement:

Le code CASTEM permet de gérer des problèmes très variés (mécanique, fluide, thermique). Il faut donc préciser avant tout calcul, le modèle de comportement associé aux différentes géométries définies.

Pour la poutre modélisée (comme model solidaire ; acier, béton et plaques de confinement) on choisit le comportement mécanique élastique plastique.

III-6.6.ii) Caractéristiques des matériaux :

Le modèle de comportement choisi ci-dessus nous indique alors les différentes caractéristiques physiques ou mécaniques à préciser. Pour un modèle mécanique élastique plastique on devra injecter :

Le module deYoung.

Le coefficient de Poisson.

III-6.6.iii) Conditions aux limites et chargement :

La définition des conditions aux limites et des chargements imposés à l'élément étudié est essentielle à la résolution de tout problème élément fini. Par exemple, pour un problème mécanique, les conditions aux limites pourront être des déplacements bloqués ou les chargements des forces imposées (poids propre, force ponctuelle).

Pour le la poutre notre condition aux limites est de bloquer (u_y et u_z) de la poutre aux deux appuis et u_x dans l'un pour simuler l'appui simple Ensuite nous allons appliquer une pression filiforme répartie uniformément sur la deux lignes surface supérieure de la poutre.

III-6.6.iv) Résolution :

La résolution est dans la majorité des cas gérée par des opérateurs de CASTEM. Elle peut être linéaire (élasticité, thermique stationnaire) ou non linéaire (plasticité, viscoélasticité, thermique transitoire). Dans ce dernier cas, la résolution est approchée à l'aide de méthodes numériques

(résolution explicite, implicite, semi-implicite). Nous avons opté pour un modèle élasto-plastique, il s'avère alors nécessaire d'utiliser le calcul 'pas-a-pas'.

III-6.6.v) Modèles de plasticité :

Lorsqu'un matériau est endommagé sous des sollicitations extérieures puis déchargé, les microfissures ne se referment pas totalement. La rugosité des fissures formées durant le chargement empêchent le retour à l'état initial. Comme nous l'avons vu, les modèles d'endommagement isotrope ne sont pas appropriés pour décrire les déformations irréversibles: une contrainte nulle ne correspond à une déformation nulle.

Dans la quasi-totalité des modèles, les déformations irréversibles sont qualifiées de plastiques et sont associées à la définition d'une fonction de charge (par analogie à la plasticité).

De nombreux modèles de plasticité associés avec les autres phénomènes non-linéaires ont été élaborés, afin de traiter les différents phénomènes liés au comportement complexe du béton. Parmi ces modèles, on peut citer le travail de Willam et Warnke (1974), Sfer et al. (2002) et Papanikolaou et Kappos (2007).

III-6.6.vi) Effets d'échelle à la rupture des structures en béton :

Alors que du point de vue de l'analyse par éléments finis, un modèle non local est développé afin d'éviter une localisation erronée de l'endommagement dans une bande d'épaisseur nulle, du point de vue mécanique, l'objectif principal d'un modèle non local est de reproduire l'effet d'échelle. La notion d'effet d'échelle, caractérise essentiellement la dépendance des performances mécaniques nominales des structures avec leur dimension caractéristique D . Seulement la théorie déterministe de Bazant sera étudiée pour les raisons suivantes :

- Elle introduit une taille caractéristique qui dépend de la taille de l'hétérogénéité.
- Elle a été vérifiée pour un grand nombre de données expérimentales, pour différents matériaux (béton, mortier, roches, céramiques, etc.), pour des échantillons entaillés ou non, de géométries différentes (poutres, cylindres) et soumis à diverses sollicitations mécaniques (flexion trois points, essais de compression, essais de fendage).

Il est simple de déterminer ses paramètres à partir d'essais expérimentaux.

Bazant suggère que le phénomène d'effet d'échelle observé dans les structures, est dû à une propagation stable des fissures jusqu'à atteindre l'effort maximal, conjugué à une redistribution des contraintes et à un relâchement de l'énergie emmagasinée engendré par les fissures. Pour des petites structures, dont la taille n'est supérieure que de quelques fois celle de l'hétérogénéité (granulat), l'effet d'échelle est négligeable ; ainsi, la théorie de la plasticité ou de l'élasticité, basée sur la théorie de la résistance des matériaux (RdM), est suffisante pour estimer leur résistance nominale. Par ailleurs, pour des grandes structures, où l'échelle des hétérogénéités du matériau devient négligeable, le comportement de la structure s'approche de celui décrit par la mécanique élastique linéaire de la rupture (MELR). Dans ce cas, en l'absence de longueur interne, l'effet d'échelle structurel est caractérisé par une loi en puissance. Cependant, le comportement des structures de taille moyenne ne peut être décrit ni par la RdM, ni par la MELR, mais par une transition entre ces deux approches. Pour résoudre ce problème, Bazant (1984) a démontré analytiquement que la localisation des déformations due à un comportement adoucissant engendre un effet d'échelle sur la dissipation d'énergie des structures.

III-6.7 Opérateurs utilisée pour le poste processeur:

III-6.7.i) Post-traitement :

La résolution des problèmes mécaniques donne la valeur du déplacement aux nœuds de la géométrie. Vue la symétrie, une valeur jauge du déplacement est prise à mi-travée pour toutes les analyses est le dessin des diagrammes effort-déplacement prend un nœud appartenant au béton localisé à mi-travée.

Le calcul des trois cas de figures s'illustre sur un diagramme (contraintes-déformations) combiné ; cas de référence, cas avec cerces de confinement et cas avec cerces de confinement et plaques en demi-tubes.

Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons développé une application de saisie géométrique, sa conversion paramétrique et la modélisation mécanique correspondante. Toutes les étapes inhérentes à la mise en exécution de l'application y sont présentées et commentées. Une explication exhaustive et qualitative des différentes étapes est également présentée.

Chapitre IV :

Application et interprétation

CHAPITRE IV : APPLICATION ET INTERPRETATION

INTRODUCTION:

Une mise à épreuve du programme (un déroulement) se fait en jouant sur deux paramètres. Le but est d'arriver rapidement à une confrontation des résultats de calcul numérique avec l'expérimental. ceci dit le programme peut modéliser rapidement tout les cas possibles « physiquement » de modèles expérimentaux et les convertir au code castem et faire l'analyse en éléments finis.

La présentation des résultats numérique s'effectue en extrayant la réponse globale force-déplacement de la poutre en compression sous différents chargement.

IV-1 COMPORTEMENT GLOBAL DE LA STRUCTURE ET INFLUENCE DE VARIATION DES PARAMETRES GEOMETRIQUES SUR LE CONFINEMENT :

Une analyse élastique ne montre pas une grande différence entre le cas confiné et non confiné. la raison est due au faite que le confinement ne commence à travailler que quand le moment de sollicitation commence à dépasser le moment résistant de la section de béton armé.

Ainsi l'analyse post-élastique est inévitable pour mettre en exergue la différence entre les états confinée et non confiné. les deux paramètre de la courante analyse sont la longueur du cerce et sa longueur.

Cette analyse se fait en fixant un paramètre et en variant l'autre. Une fois terminée en enchaine en variant le second paramètre.

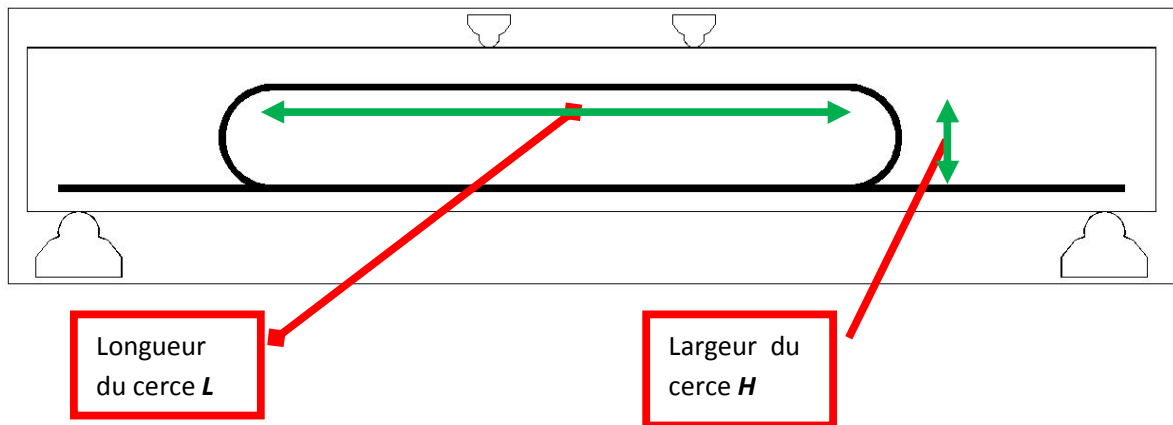


Figure IV- 1 : schémas de base des paramètres variables.

IV-1.1 Déplacement seuil:

Les diagrammes de l'analyse paramétriques prennent les allures suivantes pour l'analyse poste-élastique :

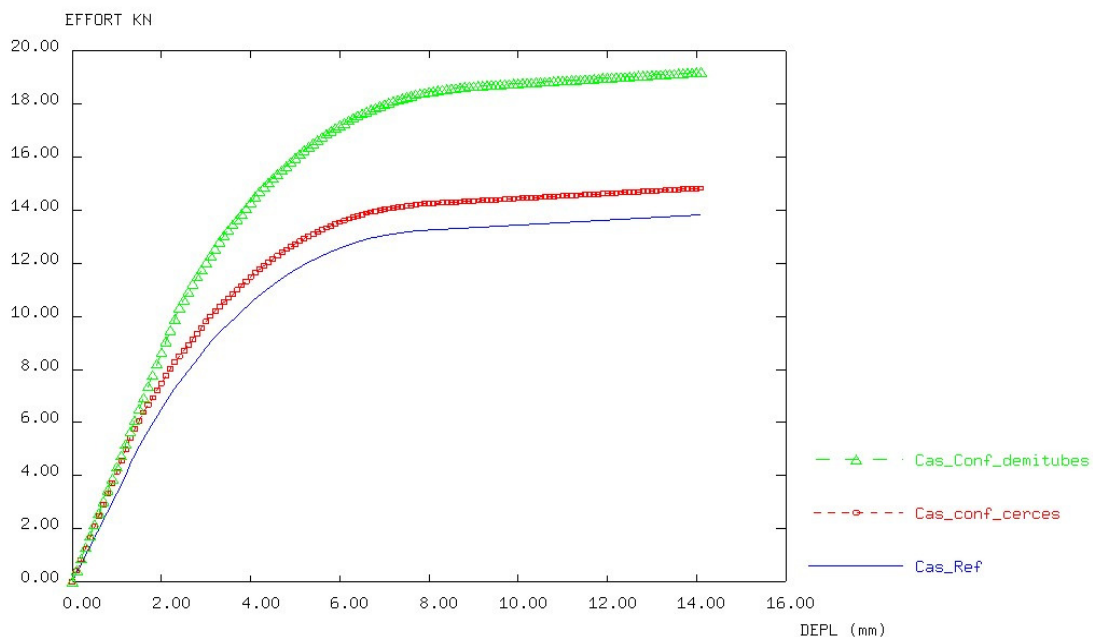


Figure IV- 2:graphiques combiné des cas calculés

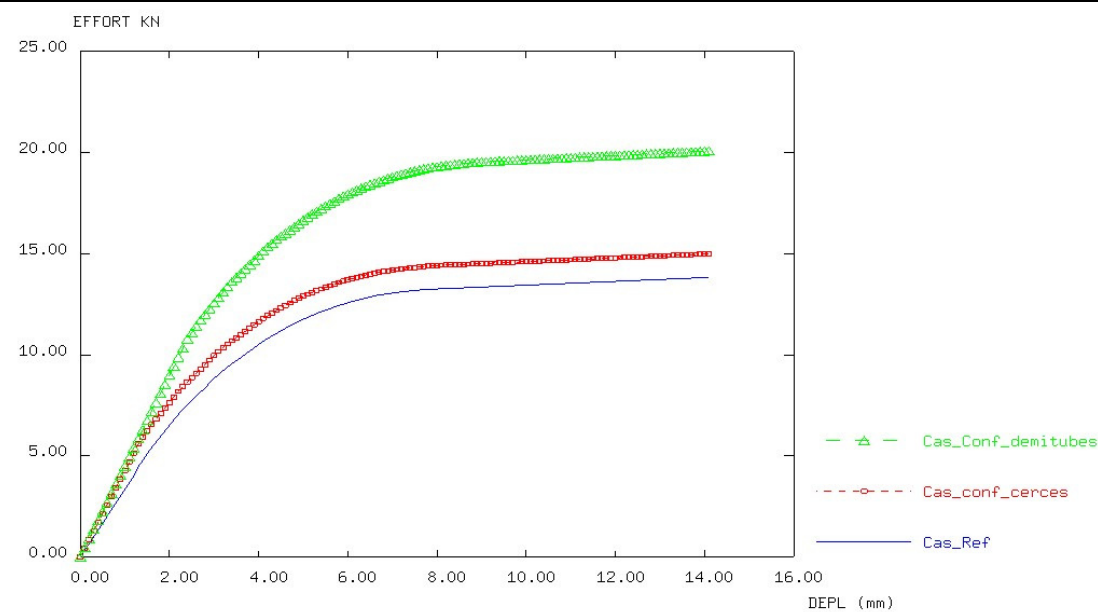
Les diagrammes (effort-déplacement) sont pour analyse de synthèse ,accompagnés de quelques valeurs filtrés dans le tas de valeurs sorties de Castem et pour faciliter la détection de la différence entre le cas confiné et non confiné, on se base sur une valeur de déplacement seuil

pour analyser le rapport en ce déplacement figé entre l'effort pour l'atteindre dans le cas confiné et non confiné. Un rapport est calculé pour chaque cas pour en prédit l'apport que ramène le confinement à la rigidité initiale de la structure.

IV-2 APPLICATION SUR L'INFLUENCE DE VARIATION DE LA LONGUEUR DU CERCE :

Une analyse en variant le paramètre L=longueur du cerce est faite tout les 2cm de 0cm jusqu'à 100cm. à titre d'illustration, nous présentons un exemple pour le cas de L= 0,55 m. Les autres courbes illustrant l'influence de la variation de la longueur L sont données en annexe.

Epreuve où L= 550mm - H= 57mm:



valeurs filtrées du graphique.

1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort[KN]poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort[KN]avec cerces	0.00E+00	8.56E-01	3.42E+00	6.54E+00	1.03E+01	1.39E+01	1.49E+01
4	Effort[KN]avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.98E-01	3.59E+00	7.19E+00	1.31E+01	1.83E+01	1.99E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

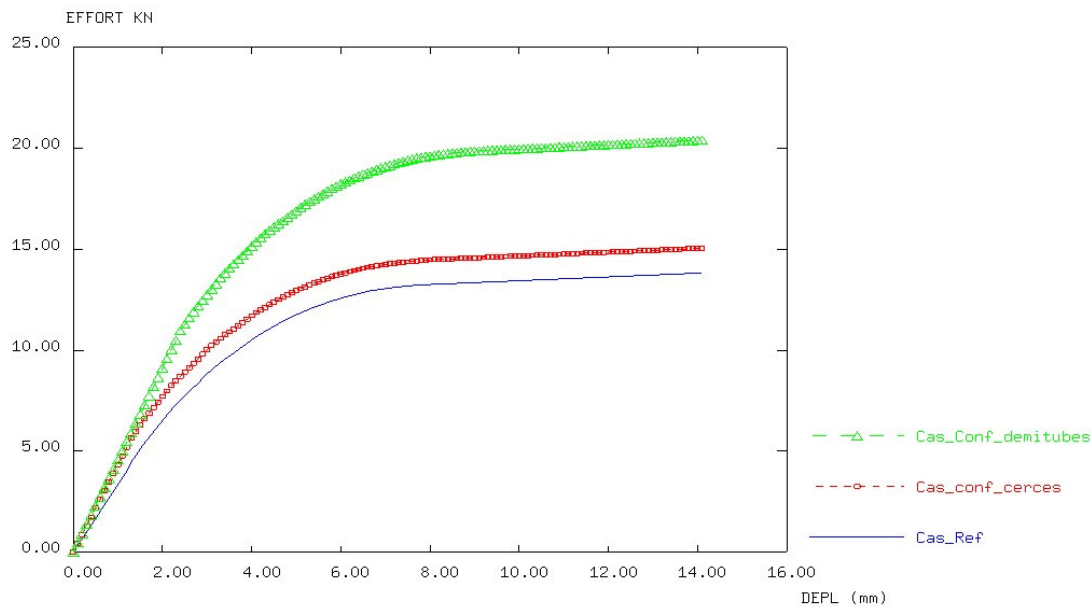
cas (3)/cas (2) = 13.94/12.80 = 108.89%

cas (4)/cas (2) = 18.34/13.94 = 143.26%

IV-3 APPLICATION SUR L'INFLUENCE DE VARIATION DE LA LARGEUR DU CERCE :

En prenant $L=550\text{mm}$ qui est en fait la valeur optimale trouvée précédemment et en faisant varier H (=largeur du cerce) sur le spectre 1cm à la hauteur du coffrage d'où l'on soustrait l'enrobage($1\text{cm} \rightarrow d$), Une analyse est faite tout les 4mm de 1cm jusqu'à 9,9cm . à titre d'illustration, nous présentons un exemple pour le cas de $L= 0,55 \text{ m}$. Les autres courbes illustrant l'influence de la variation de la largeur H sont données en annexe.

Epreuve où $L= 550\text{mm}$ - $H= 78\text{mm}$



valeurs filtrées du graphique.

1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.62E-01	3.45E+00	6.58E+00	1.04E+01	1.40E+01	1.49E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	9.06E-01	3.62E+00	7.25E+00	1.32E+01	1.85E+01	2.02E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = $13.98/12.80 = 109.18\%$

cas (4)/cas (2) = $18.52/13.98 = 144.69\%$

IV-4 ANALYSE ET SYNTHÈSE :

Une analyse globale des diagrammes (effort-déplacement) montre que seul les cas de confinement à demi-tubes (total) permettent d'agrandir l'écart entre lui et le cas de référence (sans confinement).

IV-4.1 L'incrément de rigidité :

C'est le rapport entre l'effort nécessaire pour atteindre le déplacement seuil dans le cas de référence et le cas totalement confiné.

IV-4.2 L'incrément de rigidité dans le cas de variation de longueur du cerce:

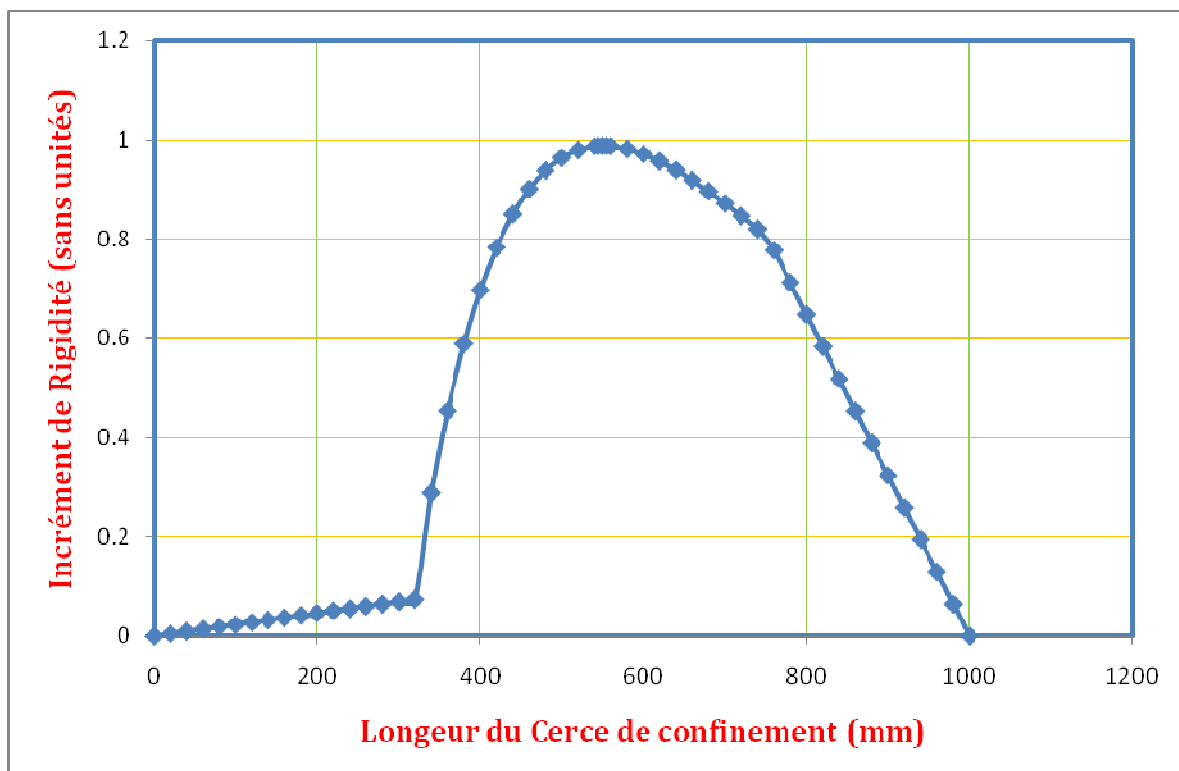


Figure IV- 3 : variation remarquées de l'incrément en fonction de la longueur

Remarques : à priori le graphique se compose de 3 fonctions juxtaposées sur deux points de brisure.

IV-4.3 L'incrément de rigidité dans le cas de variation de largeur du cerce:

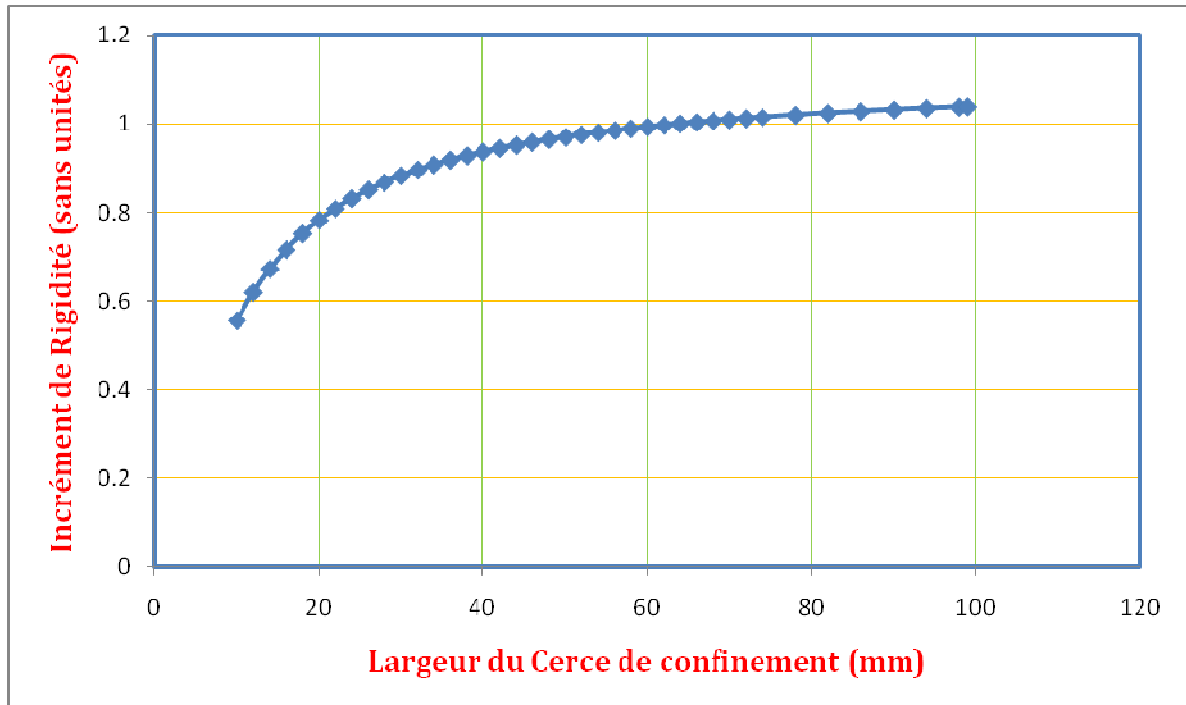


Figure IV- 4: variation remarquées de l'incrément en fonction de la largeur

Remarques : à première vue le graphique se compose d'une seule fonction

IV-4.4 Utilisation des algorithmes génétiques :

Les algorithmes génétiques (AG) sont des algorithmes d'optimisation stochastique fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Ils ont été initialement développés par John Holland (1975). C'est au livre de Goldberg (1989) que nous devons leur popularisation. Leurs champs d'application sont très vastes. Outre l'économie, ils sont utilisés pour l'optimisation de fonctions (De Jong (1980)), en programmation génétique (Koza (1992)), pour le contrôle de pipeline (Goldberg (1981)), en théorie du contrôle optimal (Krishnakumar et Goldberg (1992), Michalewicz, Janikow et Krawczyk (1992) et Marco et al. (1996) et plus récemment Jamshidi et al. (2003)), ou encore en théorie des jeux répétés (Axelrod (1987)) et dynamiques (Özyildirim (1996, 1997) et Özyildirim et Alemdar (1998)). Les raisons de ce grand nombre d'applications sont la simplicité et l'efficacité de ces algorithmes.

Les AG s'inspirent des mécanismes de l'évolution biologique pour les transposer à la recherche de solutions adaptées au problème qu'on cherche à résoudre. L'évolution biologique procède en sélectionnant des génotypes (intégrés aux chromosomes), sur la base de l'adaptation relative à leur environnement des phénotypes qu'ils génèrent (la qualité de cette adaptation est alors mesurée par la performance - fitness - relative de chaque génotype). Les génotypes qui sont les mieux adaptés à leur environnement ont une plus grande facilité à se reproduire et la reproduction sexuée assure le croisement des gènes les plus performants dans la population. Les erreurs de copies de chromosomes pendant la reproduction introduisent par ailleurs de la nouveauté sous la forme de mutations au niveau des gènes et de leurs conséquences au niveau du phénotype correspondant. La sélection continue, dans la population, des génotypes avec la performance relative la plus élevée conduit à une amélioration de l'adaptation de la population à son environnement (cela correspond alors à une augmentation de la performance moyenne de la population).

Les AG cherchent à reproduire ce processus. La relation qui existe entre les génotypes et les phénotypes correspondent alors au codage qu'on retient pour l'espace des paramètres du problème qu'on cherche à résoudre. Les valeurs possibles d'une variable réelle ou entière seront par exemple codées sous la forme d'une chaîne binaire, équivalente aux chromosomes des génotypes), formée de 0 et de 1. Dans sa version la plus simple, à une variable, l'algorithme génétique fera évoluer une population de chromosomes, aléatoirement initialisée, sur la base de la performance relative de chacun d'eux dans le problème en considération. Le croisement et la mutation interviendront alors dans cette population de chromosomes pour permettre l'exploration de l'espace des valeurs des variables considérées (voir la section suivante pour un exemple et une présentation plus détaillée).

Les AG sont basés sur des mécanismes très simples (manipulations élémentaires de chaînes binaires), ils sont robustes car ils peuvent résoudre des problèmes fortement non-linéaires et discontinus, et efficaces car ils font évoluer non pas une solution mais toute une population de solutions potentielles et donc ils bénéficient d'un parallélisme puissant. A l'inverse, par exemple, des méthodes traditionnelles de résolutions numériques de type gradient, les AG ne sont pas basés sur une approche analytique mais sur une approche itérative et heuristique. En

cela, peu d'information est nécessaire pour leur utilisation: l'espace de recherche possible et un critère d'efficacité correspondant au fitness. Ces propriétés fort vertueuses et la facilité de leur mise en application ont conduit à un nombre croissant de travaux en économie et en finance ces dernières années. La Figure 1 (voir ci-dessous) est construite par les auteurs à partir des résultats obtenus en recherchant « Genetic Algorithm » dans les titres, les résumés et les mots-clés des publications recensées dans EconLit (voir aussi Alander(2001)). Nous observons que la première publication faisant référence aux AG date de 1990 et il s'agit d'un article publié dans la revue *Managerial and Decision Economics*. En suite, nous donnons pour chaque année le nombre total de publications publiées avant le premier janvier de cette année. Ainsi observe-t-on 200 articles publiés avant premier janvier 2004. On observe une croissance très forte de l'utilisation des AG depuis 1994.

Dans le cadre du courant projet qui n'est pas de détailler sur les algorithmes génétiques, nous utilisons la démo de Fabien Moutarde de l'école des mines de paris pour arriver à trouver les formules équivalentes à la l'impacte de la variation des longueurs et largeurs des cerces sur les incréments de rigidités.

IV-4.5 Application des AG pour prédire la variation de L'incrément de rigidité en fonction de la largeur du cerce:

Une analyse du problème avec les AG abouti à loi suivante :

$$Ic(H) = \begin{cases} \text{si } L < 0.32 ; 0.132 * L \\ \text{si } L < 0.75 ; 5.8 * \frac{\ln(3.2 * L)}{e^{3.2 * L}} \\ \text{si } L > 0.75 ; -1.85 * L + 1.85 \end{cases}$$

L en mètres et Ic est sans unités.

IV-4.6 Application des AG pour prédire la variation de L'incrément de rigidité en fonction de la longueur du cerce:

Une analyse du problème avec les AG abouti à loi suivante :

$$Ic(H) = ATAN(100 * H)/1.397$$

H en mètres et Ic est sans unités.

IV-4.7 Variation de la force en fonction de la longueur et la hauteur:

Puisque c'est normalisé (Divisés par le max) La combinaison des deux cas ne sera en fait qu'une multiplication.

$$F(H, L) = F_{ref} + Cst . Ic(H) . Ic(L) \text{ [KN]}$$

Nous pouvons aisément arriver prédire les valeurs après confinement à base de Fref. À titre d'illustration, prenons le cas de déplacement seuil D=6.4mm utilisé dans les calculs précédents nous aurons Fref=12.8KN nous aurons après tâtonnement Cst= 5.61KN. Ainsi l'expression de F devient ;

$$F(H, L) = 12.8 + 5.61 . Ic(H) . Ic(L) \text{ [KN]}$$

En variante H et L sur le spectre des cas calculé précédemment nous arrivons au tableau suivant qui sont exactement les résultats obtenus :

	H=0.00	H=0.01	H=0.02	H=0.03	H=0.04	H=0.05	H=0.06	H=0.07	H=0.08	H=0.09
L=0.00	12.800	12.800	12.800	12.800	12.800	12.800	12.800	12.800	12.800	12.800
L=0.05	12.800	12.837	12.851	12.858	12.862	12.864	12.865	12.866	12.867	12.868
L=0.10	12.800	12.873	12.903	12.916	12.923	12.928	12.931	12.933	12.935	12.936
L=0.15	12.800	12.910	12.954	12.974	12.985	12.992	12.996	12.999	13.002	13.004
L=0.20	12.800	12.946	13.006	13.032	13.047	13.055	13.061	13.066	13.069	13.072
L=0.25	12.800	12.983	13.057	13.090	13.108	13.119	13.127	13.132	13.136	13.139
L=0.30	12.800	13.019	13.109	13.148	13.170	13.183	13.192	13.199	13.204	13.207
L=0.35	12.800	13.984	14.469	14.682	14.798	14.870	14.918	14.953	14.980	15.000
L=0.40	12.800	14.997	15.897	16.294	16.509	16.642	16.732	16.797	16.846	16.885
L=0.45	12.800	15.565	16.698	17.198	17.468	17.636	17.749	17.831	17.893	17.941
L=0.50	12.800	15.837	17.082	17.631	17.928	18.112	18.236	18.326	18.394	18.447
L=0.55	12.800	15.913	17.189	17.751	18.055	18.244	18.372	18.464	18.534	18.588
L=0.60	12.800	15.861	17.115	17.668	17.968	18.153	18.279	18.369	18.438	18.491
L=0.65	12.800	15.729	16.929	17.458	17.744	17.921	18.042	18.128	18.194	18.245
L=0.70	12.800	15.548	16.674	17.171	17.439	17.606	17.719	17.800	17.861	17.909
L=0.75	12.800	15.342	16.384	16.843	17.092	17.246	17.350	17.425	17.482	17.526
L=0.80	12.800	14.842	15.679	16.047	16.247	16.371	16.455	16.515	16.561	16.596
L=0.85	12.800	14.332	14.959	15.236	15.385	15.478	15.541	15.586	15.621	15.647
L=0.90	12.800	13.821	14.239	14.424	14.524	14.585	14.627	14.658	14.680	14.698
L=0.95	12.800	13.311	13.520	13.612	13.662	13.693	13.714	13.729	13.740	13.749
L=1.00	12.800	12.800	12.800	12.800	12.800	12.800	12.800	12.800	12.800	12.800

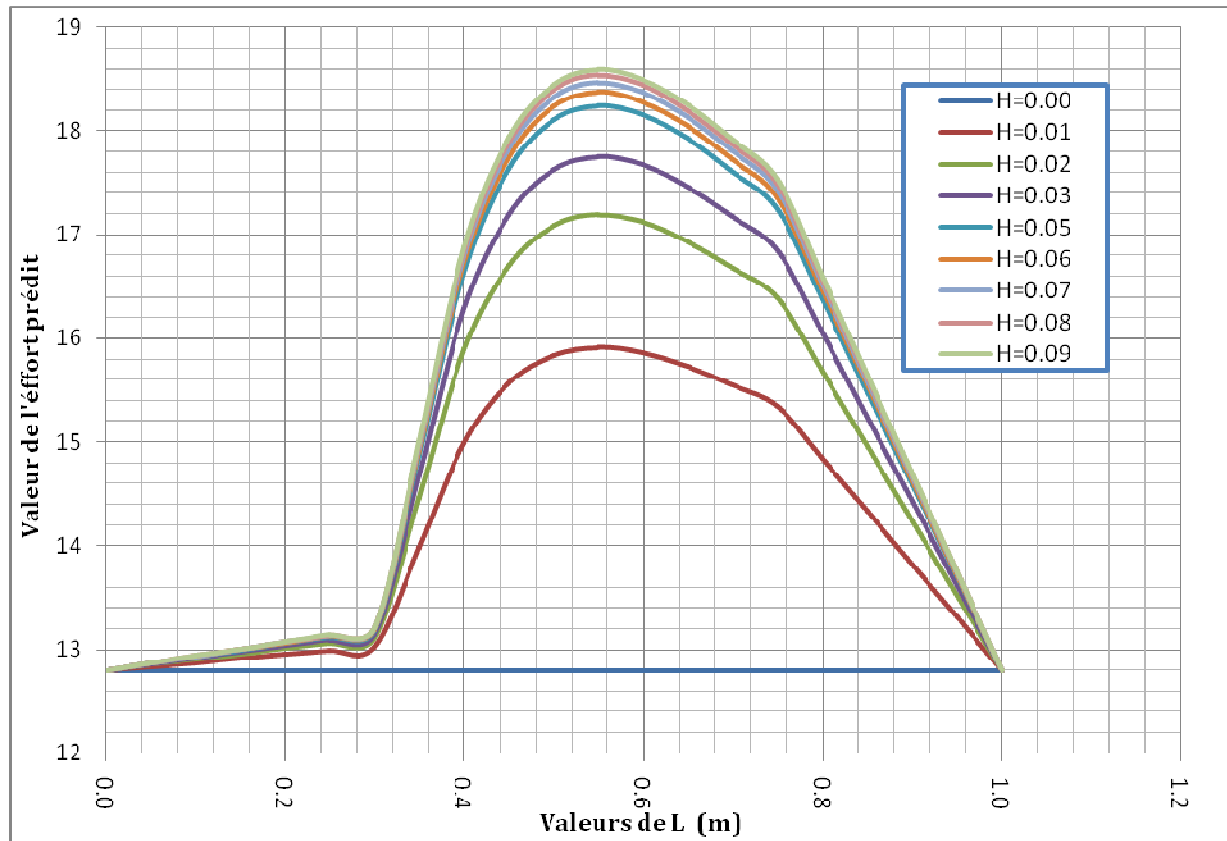


Figure IV- 5: Graphiques de Calcul $F(L)$

Interprétation :

La valeur de l'effort supporté augmente jusqu'à une limite (asymptotique) de variation de $H=0.057$ m, au-delà le fait d'augmenter la hauteur de la spirale ne sert à rien car le confinement ne peut être induit que sur la partie inférieure à l'axe neutre de la poutre.

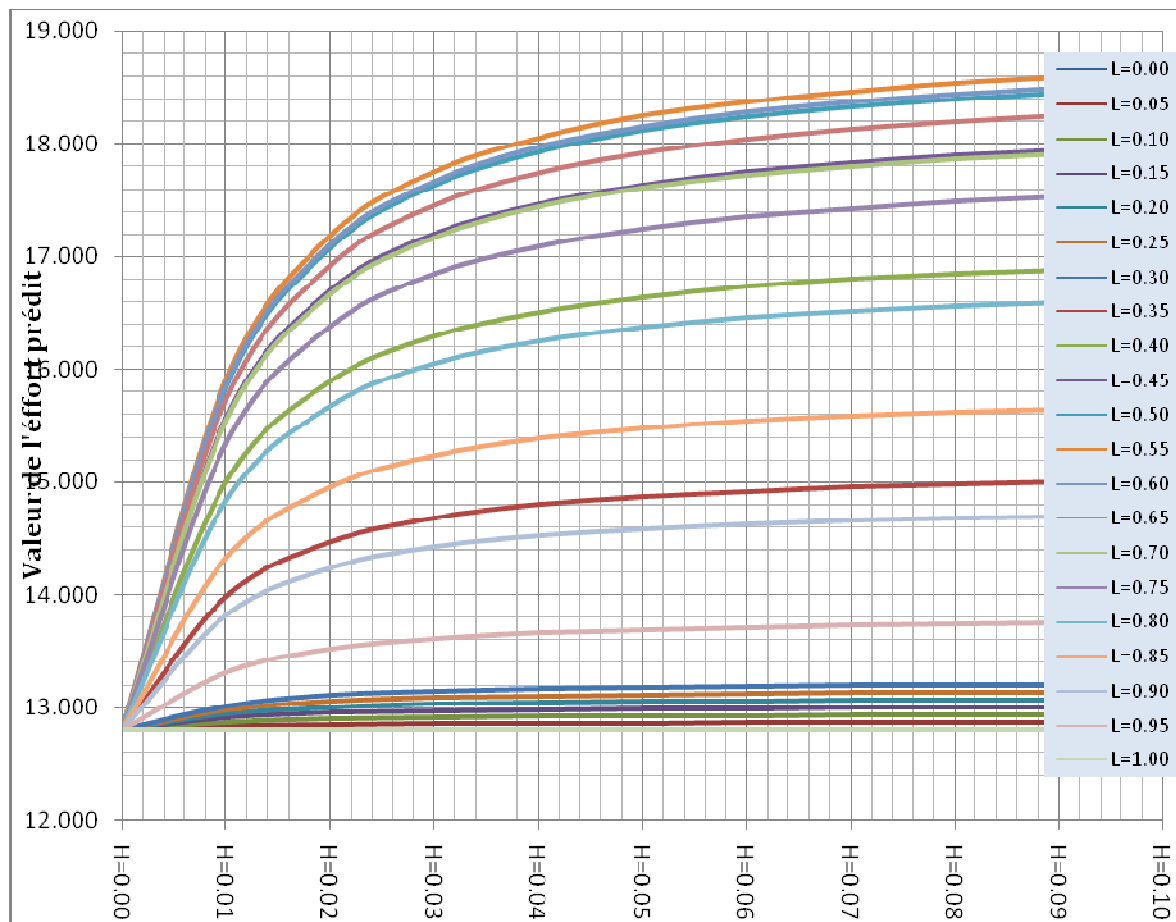


Figure IV- 6: Graphiques de Calcul F(H)

Observation :

La valeur max de l'effort obtenu se situe sur un point de rebroussement ou $L=0.55\text{m}$.

Conclusion du chapitre :

L'apport en termes de résistances, obtenu par le façonnage de l'armature de résistance en boucle (une seule spire) est démontré dans ce chapitre. L'influence de la longueur de la spire et de son diamètre est mise en exergue à travers une analyse paramétrique. Ainsi, une tentative de prédire les corrélations existantes entre les différents paramètres est explicitée. La confrontation des résultats obtenus avec ceux donnés par l'expérimental corroborent d'une manière satisfaisante. Il a été démontré que pour une poutre de dimensions 8x16x110 cm, la meilleure variante est obtenue avec une boucle de 55 cm de longueur et 8 cm de diamètre.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES :

Le but principal de la présente étude est de montrer le rôle primordial que joue le confinement par spirales sur l'amélioration du comportement des éléments de structures en béton armé, en termes de résistance. Cela a été montré à l'aide d'une simulation numérique appliquée sur des spécimens numériques et réels en béton armé.

Un modèle basé sur la déformation plastique, en l'occurrence le modèle 'Lemaitre-Chaboche', a été considéré dans cette simulation numérique.

Dans l'application nous avons travaillé sur le cas d'une seule spirale à géométrie variable. Le nombre de cas possible sur lequel on peut faire la simulation avec le présent programme, en variant le nombre et la configuration géométrique, est très grand.

Ce travail consiste en une contribution modeste pour arriver à trouver, grâce aux algorithmes génétiques, les corrélations multiparamétriques existantes. Les résultats obtenus dans cette étude mettent en exergue l'apport en termes de pressions de confinement latéral des boucles et montre clairement l'applicabilité de cette technique dans la pratique.

En perspective, Une des pistes à explorer est le recours à une pseudo-loi de dimensionnement des cas des poutres en l'implémentant dans un logiciel qui travaille sur le standard CAO autocad, et qui peut facilement être converti en outil de dimensionnement, de projection et même de métré de la structure considérée.

Références Bibliographiques :

[1] Pratique de l'eurocode 2, Jean ROUX.

[2] Eurocode 2.Béton armé, disposition et données générales par jean PERCHAT, Ingénieur des arts et manufactures, professeur honoraire à l'école supérieure des travaux publics et au centre des hautes études de la construction, chapitre 3 matériaux 3.2 Aciers de béton armé C 2 330 7

[3] Eurocode 2.Béton armé (3.19), disposition et données générales par jean PERCHAT, Ingénieur des arts et manufactures, professeur honoraire à l'école supérieure des travaux publics et au centre des hautes études de la construction.

[4] le béton précontraint, fiche technique n°7, disponible sur :<http://www.explorations-architecturales.com/data/new/fiche44.htm>

[5] Jose A.Fernandez Ordonez,(1979),Eugène Freyssinet ,Grupo 2C, Barcelone.

[6] L'art de l'ingénieur, (1997) sous la direction d'Antoine Picon, le moniteur, centre Georges Pompidou, Paris.

[7] Info ciment, la base documentaire de référence sur les ciments et les bétons, disponible sur :<http://www.infociment.fr/beton/types/beton-contraint-types> ;

[8] Nambel : section d'un plan et d'un tore par un plan et par une sphère bitangente.Nouvelle annale de mathématique 2^{ème} série, tome 4 (1868).pages 346-347. Sur le site http://archive.numdam.org/ARCHIVE/NAM/NAM_1865_2_4_/NAM_1865_2_4__346_1/NAM_1865_2_4__346_1.pdf

[9] M.A Mansur and Kiang-Hwee Tan, "Concrete Beams with openings analysis and design," New York:press LLC, 1999.

[10] Muhammad Masood Rafi, Ali Nadjai, Faris Ali, Didier Talamona "Aspects of behaviour of CFRP reinforced concrete beams in bending," Elsevier Ltd., pg 277-285, August 2006.

[11] C.-T. T. Hsu, W. Punurai, H.Bian and Y.Jia "Flexural strengthening of reinforced concrete beams using carbon fibre reinforced polymer strips," Department of Civil and Environmental Engineering, New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ 07102 USA, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA, pg 279-288, 4 march 2002.

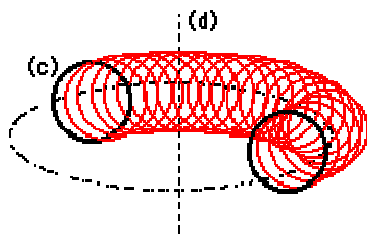
[12] Tom Norris, Hamid Saadatmanesh, Member, ASCE, and Mohammad R.Ehsani, Member, ASCE "Shear and flexural strengthening of R/C beams with carbon fiber sheets," Journal of structural Engineering, Vol. 123, No. 7 pg 903-911, July 1997.

- [13] Riyadh Al-Amery and Riadh Al-Mahaidi "Coupled flexural-shear retrofitting of RC beams using CFRP straps ," Elsevier Ltd., pg 457-464, April 2006.
- [14] J.A.O. Barros, S.J.E. Dias and J.L.T. Lima "Efficacy of CFRP-based technique for the flexural and shear strengthening of concrete beams," Elsevier Ltd., pg 203-217, September 2006.
- [15] M.R. Islam, M.A. Mansur and M. Maalej "Shear strengthening of RC deep beams using externally bonded FRP system," Elsevier Ltd., pg 413-420, April 2004.
- [16] www.engineersedge.com/material_science/fatigue_failure.htm
- [17] MAKHLOUF. N 'Caractérisation en statique du comportement en traction du béton armé de fibre en copeaux'. Université de Tizi Ouzou, Département de génie Civil 2010.
- [18]. GABRYSIK. F – matériaux- les bétons. Chapitre 4.
- [19]. GAGLIARDINI.O (UJF-GRENOBLE). Cours de béton armé. UEP GCI OPTION OS(2004-2005).
- [20]. ADAM et NEVILLE.M « Propriétés des bétons ». Editions Eyrolles, Paris 2000.
- [21]. BENZAID.R ' contribution à l'étude des matériaux composites dans le renfort et la réparation des éléments structuraux linéaires en béton 2010.
- [22]. BERTHELOT.J-M. 'Matériaux composites- comportement mécanique et analyse des structures'. Paris.
- [23]. COLLINS.M.P et MITTCHELL.D. « Prestressed Concrete Structures », Response Publications, Toronto, Canada, 1997, 61-62 pp.
- [24].GHANNOUM.W (1998) 'size effect on shear strength of reinforced concrete beam' memoir de master, Ecole normale supérieure de CACHAN.
- [25]. AZIZNAMIN.A, BAUMK USKA, BRUNGARDT, P. et HATFIELD.E. (1994). "Seismic Behaviour of square High-strenght Concrete Columns,"ACI structural Journal, 91(3),336-345.
- [26]. SHEIKH.S.A. et UZUMERI S.M. " Strenght and Ductility of Tied Concrete Columns", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 106 No ST5, May 1980, 1079-1102 pp.
- [27]. RICHART F.E., BRANDTZAEG A. et BROWN R.L. (1928). "A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses, University of Illinois, Engineering Expérimental Station, Urbana, Bulletin no 185, 104 p.
- [28]. PARK R. et PAULAY T. « Reindorced Concrete Structures », John Wiley and Sons, New York 1975, 21-23 pp.

- [29]. SAAFI.M. , TOUTANJI A.H. and Li Z.; “Behaviour of Concrete Columns Confined with Fibre Reinforced Polymer Tubes”, ACI Materials Journal, Vol. 96, no 4, Jul-Aout 1999, 500-509 pp.
- [30]. M.SHAHAWY. A.MIMIRAN.T. BEITELMAN (2000). “Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns composites, part B “engineering31 (2000) 471-480 pp.
- [31]. FAM A.Z., et RIZKALIA S.H. (2001a) ; “Behaviour of axially loaded concrete filled circular fibre-reinforced Polymer Tubes”, ACI structural Journal, Vol. 98, no 3, 280-289 pp.
- [32]. HUEI-JENG LIN et CHIN-TING CHEN , “Strength of Concrete Cylinder Confined by Composite Materials” Journal of reinforced plastics and composites, Vol. 20, no 18/2001, pp.1577-1.
- [33]. KARABINIS , A.L, et ROUSAKIS T.C. , “Concrete Confined by FRP material: a plasticity approach” Engineering structures 24 (2002) 923-932 Received 20 June 2001; received in revised form 3 January 2002; accepted 3 January 2002.
- [34]. LAM L. et TENG J.G. (2003a) “Design – oriented stress- strain model for FRP- confined concrete”, Construction and Building Materials, Vol. 17, pp.471-489.
- [35]. LAM L. et TENG J.G. (2003b) “Design – oriented stress- strain model for FRP- confined concrete in rectangular columns ”,Journal of reinforced plastics and composites, Vol. 22, no 13, pp.1149-1186.
- [36]. MATTHYS S., TOUTANJI H., AUDENAERT K. et TAERW L. (2005) ; “Axial load Behaviour of large- scale columns confined with fibre-reinforced Polymer composites”, ACI structural Journal, Vol. 102, no 2, 258-267 pp.
- [37]. HADI M. N. S., (2006) ; “Comparative study of eccentrically loaded FRP wrapped columns” Composite structures, Vol.74, no 2, 127-135 pp.
- [38]. BERTHET J.F., FERRIER E. et HAMELIN P. (2006) “Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets, Part B: modeling”. Construction and Building Materials, Vol. 20, pp.338-347.
- [39]. G.WU, Z.S WU, Z.T. LU and Y.B. ANDO. “Structural performance of Concrete Confined with hybrid FRP Composite ” Journal of reinforced plastics and composites, Vol. 40 no 12/2008, pp.1323-1348.
- [40]. KARAYANI.A ‘contribution à la modélisation non linéaire du comportement mécanique du béton et des ouvrages en béton armé et renforcement’.
- [41]. E. LE FICHOUX et ESTA-LIME 16 avril 1998 présentation et utilisation de CASTEM.

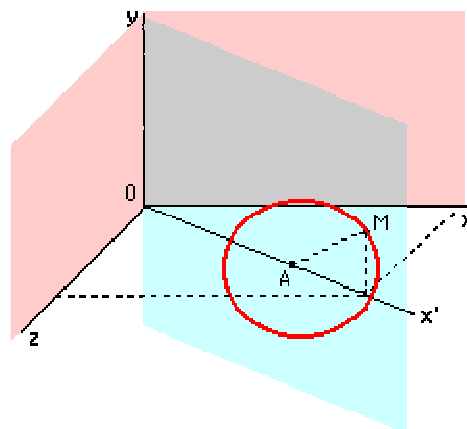
ANNEXES

Annexe1 : Calcul des Spires et des ellipses :



Le tore est une surface de l'espace engendrée par la rotation d'un cercle (c) autour d'un axe (d) situé dans son plan et ne le coupant pas.

Rappelons que les sections d'un cône (sections coniques) et d'un plan furent étudiées par [Ménechme](#) et [Apollonius](#). Les sections planes, d'un tore, *sections spiriques* (on coupe les *spires* du tore), sont moins connues. Elles font l'objet de ce rapport



Plaçons-nous dans un repère orthonormé (O,x,y,z). L'axe des y étant choisi "vertical" eu égard aux intersections planes à venir ci-dessous...

Le centre A du cercle générateur est à la distance a de l'origine et son rayon est r . M est un point quelconque du tore généré dont l'axe sera (Oy).

En notant X l'abscisse de M sur l'axe pivotant (Ox'), on a à chaque "instant" : $X^2 = x^2 + z^2$.

D'autre part M décrit, dans le plan (yOx') le cercle de centre A(a,0). Son équation est alors :

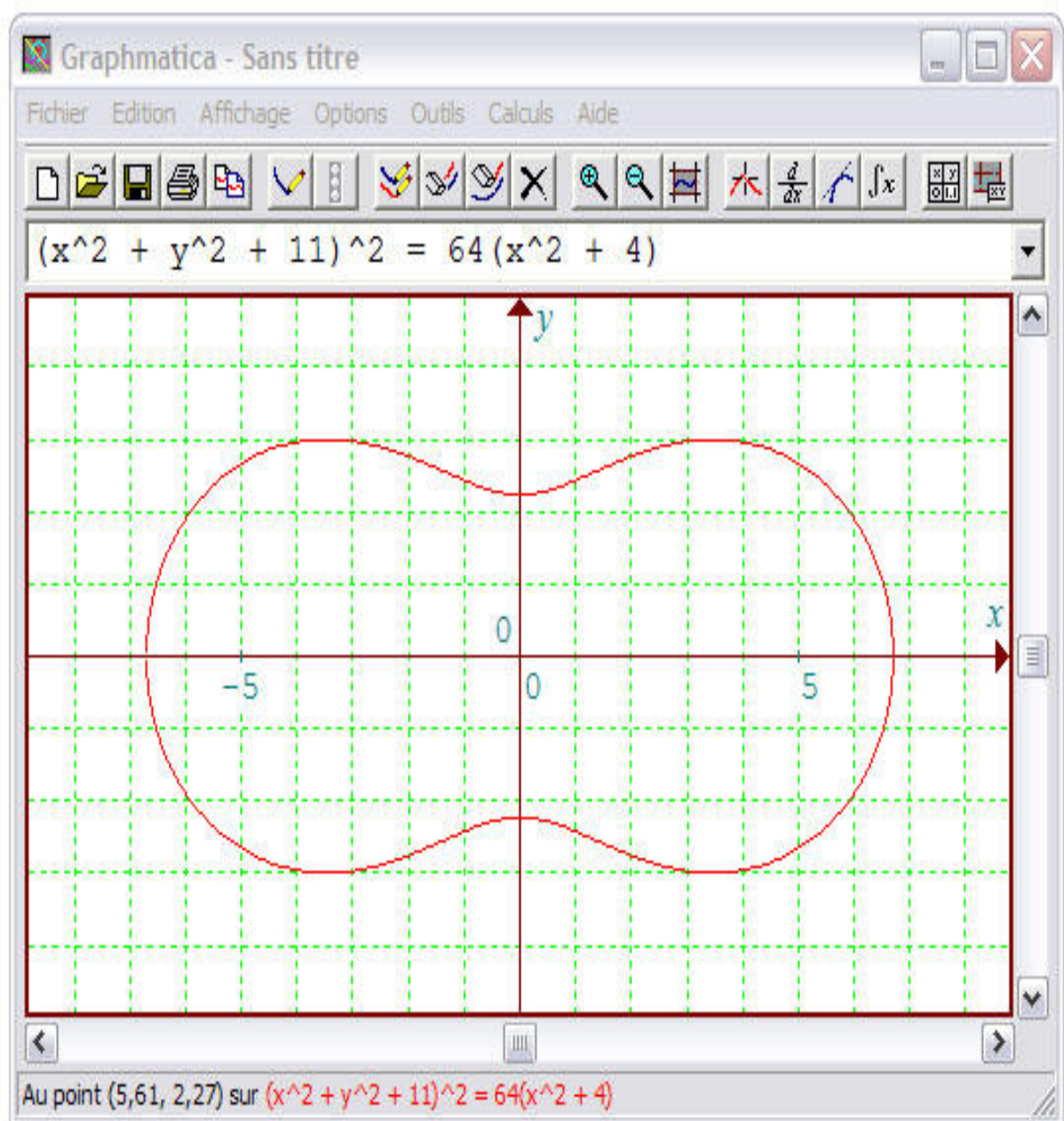
$$(X - a)^2 + y^2 = r^2$$

On remplace X par la racine carrée de $x^2 + z^2$. On développe, on isole le radical restant et on élève au carré. L'équation du tore est alors :

$$(x^2 + y^2 + z^2 + a^2 - r^2)^2 = 4a^2(x^2 + z^2)$$

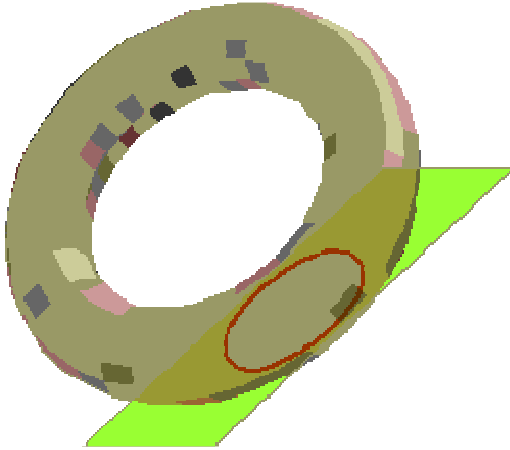
Nous allons couper le tore par un plan "vertical" (v) parallèle au plan (yOx), donc à l'axe du tore, dont l'équation sera alors de la forme $z = d$, constante positive mesurant la distance de (v) à l'origine. L'équation de l'intersection est obtenue en remplaçant z par d dans l'équation ci-dessus :

$$(x^2 + y^2 + d^2 + a^2 - r^2)^2 = 4a^2(x^2 + d^2)$$



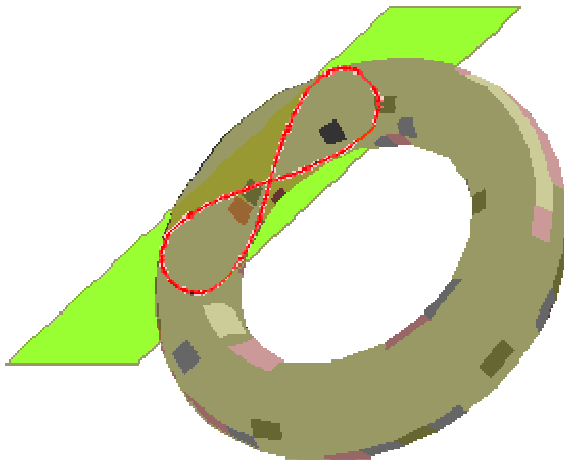
Tracé par [Graphmatica](#), $d=2$, $a=4$, $r=3$

Les intersections sont simulées ci-dessous sur une chambre à air ayant durement souffert... :



$$a + r/2 < d < a + r$$

Cette rustine n'est pas une ellipse
elle s'apparente à un [ovale de Cassini](#)

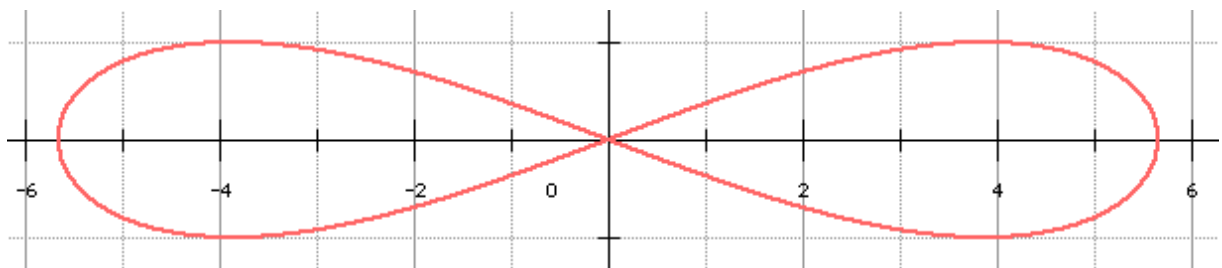


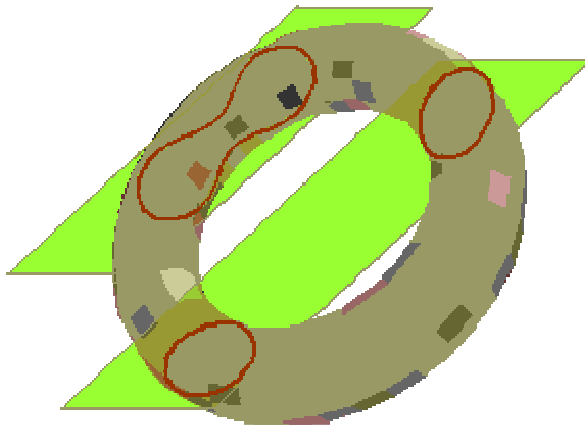
$$d = a - r$$

Cette courbe en forme de 8 sera
d'autant plus allongée que a sera grand
devant r .

Lorsque $a = 2r$, on obtient la
célèbre [lemniscate de Bernoulli](#),
cas particulier d'[ovale de Cassini](#)

(ci-dessous, le cas $a = 8r$)





Au fond : $a - r < d < a + r/2$

s'apparente à un [ovale de Cassini](#)

Plus au centre : $0 \leq d < a - r$

s'apparente à un [ovale double de Cassini](#)

se ramenant à deux cercles lorsque $d = 0$

Les sections d'un tore par un plan parallèle à son axe seraient-elles des [ovales de Cassini](#) ? Non, sauf pour le cas $d = r$. Posons pour simplifier $b^2 = d^2 + a^2 - r^2$ (loisible puisque $a > r$). L'équation générale des courbes d'intersection est alors :

$$(x^2 + y^2 + b^2)^2 = 4a^2(x^2 + d^2)$$

Nous savons que l'équation générale des [ovales de Cassini](#) est :

$$[(x + m)^2 + y^2] \times [(x - m)^2 + y^2] = k^4$$

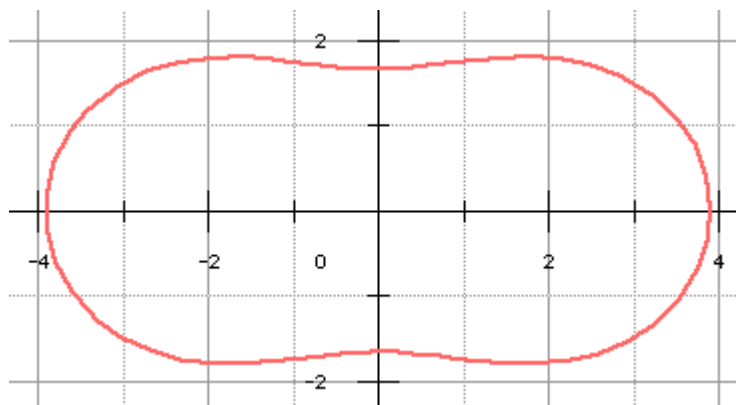
Il suffit de développer et d'identifier les deux équations pour obtenir $m = b = a$, puis $d = r$ et $k^2 = 2ar$:

$$[(x + a)^2 + y^2] \times [(x - a)^2 + y^2] = 4a^2r^2$$

Cette équation montre qu'un choix convenable de r conduit au fait que :

Tout ovale de Cassini est l'intersection d'un tore et d'un plan parallèle à son axe

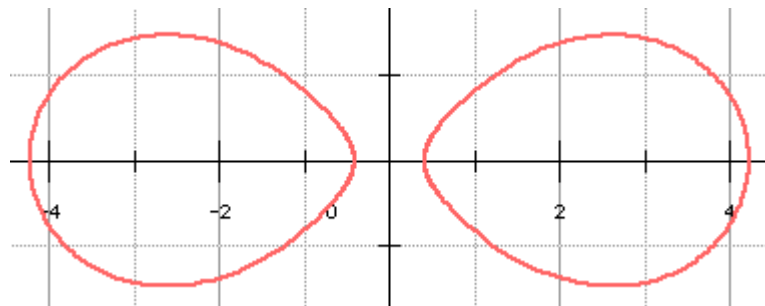
- Nous voulons obtenir l'[ovale de Cassini](#) ci-dessous correspondant à : $a = 2$ et $k = 5/2$. Il suffit de choisir $d = r = 25/16$.



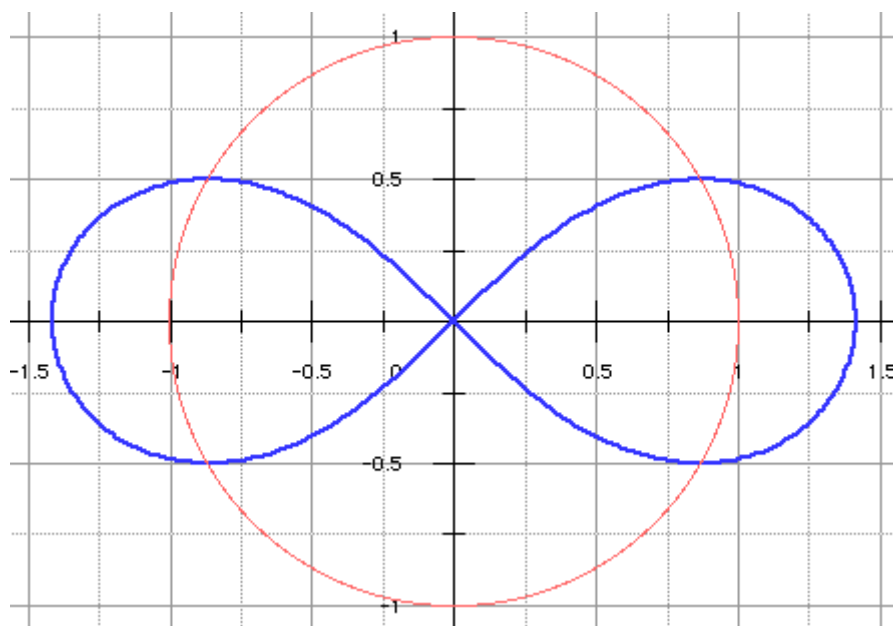
- Nous voulons obtenir l'[ovale de Cassini](#) ci-dessous correspondant à : $a = 3$ et $k = 2$. Il suffit de choisir $d = r = 2/3$.



- Nous voulons obtenir l'[ovale de Cassini](#) ci-dessous correspondant à : $a = 3$ et $k = 2,97$. Il suffit de choisir $d = r = 1,47015$.



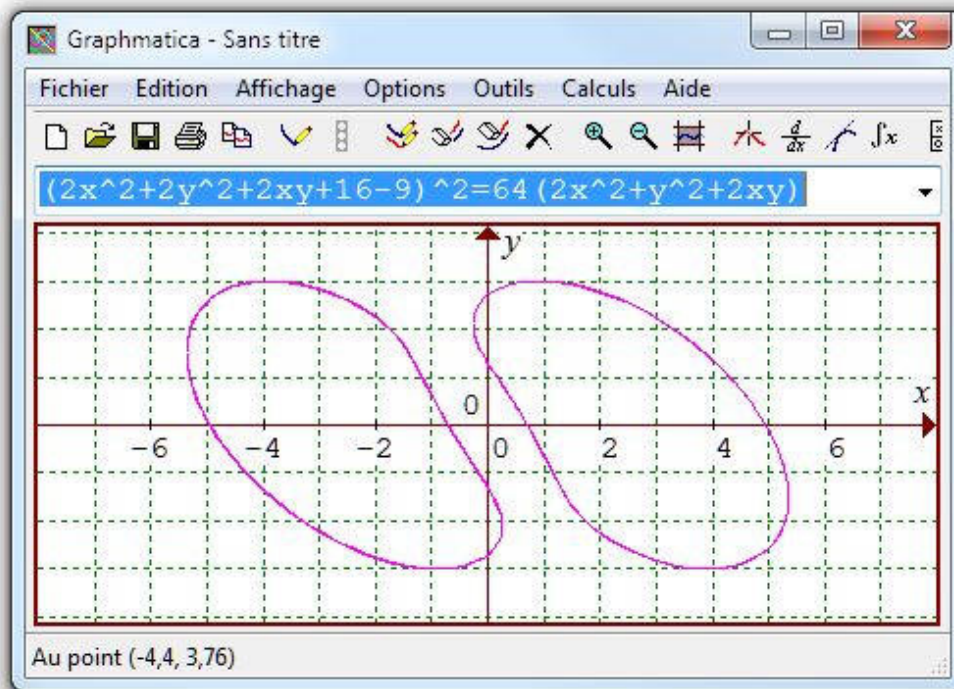
- Si $a = 2r$, alors $k^2 = 4r^2$, donc $k = 2r = a$. On a aussi $d = a - r$. On retrouve la [lemniscate de Bernoulli](#), cas particulier d'[ovale de Cassini](#) ($k = a$).



- On peut bien sûr chercher à intersecter le tore avec un plan quelconque. L'équation d'un tel plan est de la forme $ax + by + cz + d = 0$. Si c est non nul, on exprimera z en fonction de x et y : $z = \phi(x,y)$, et on reportera dans l'équation du tore :

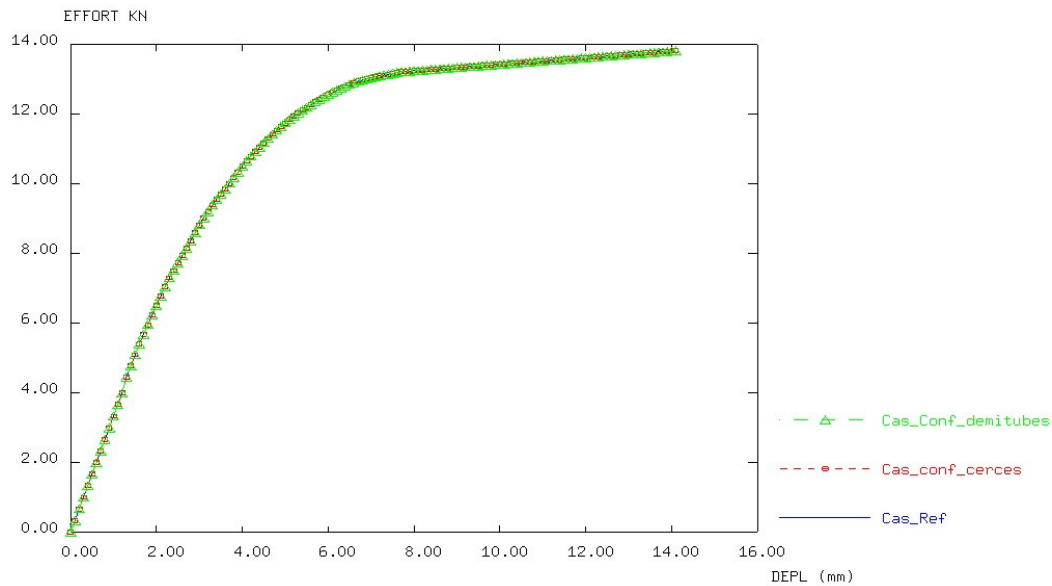
$$(x^2 + y^2 + \phi^2(x,y) + a^2 - r^2)^2 = 4a^2(x^2 + \phi^2(x,y))$$

- Par exemple : $x + y + z = 0$ est l'équation d'un plan passant par O, dont on extrait $z = -x - y$:



Annexe2 : APPLICATION SUR L'INFLUENCE DE VARIATION DE LA LONGUEUR DU CERCE :

Epreuve où L= 0mm - H= 57mm 0 :



valeurs filtrées du graphique.

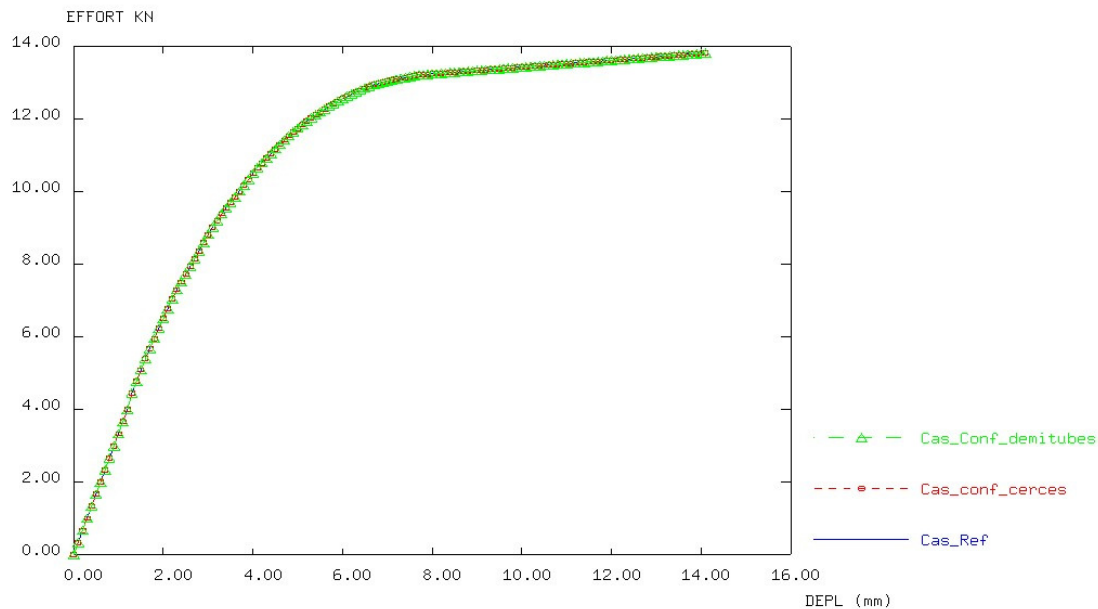
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 12.80/12.80 = 100.00%

cas (4)/cas (2) = 12.80/12.80 = 100.00%

Epreuve où L= 20mm - H= 57mm 0.0046 :



valeurs filtrées du graphique.

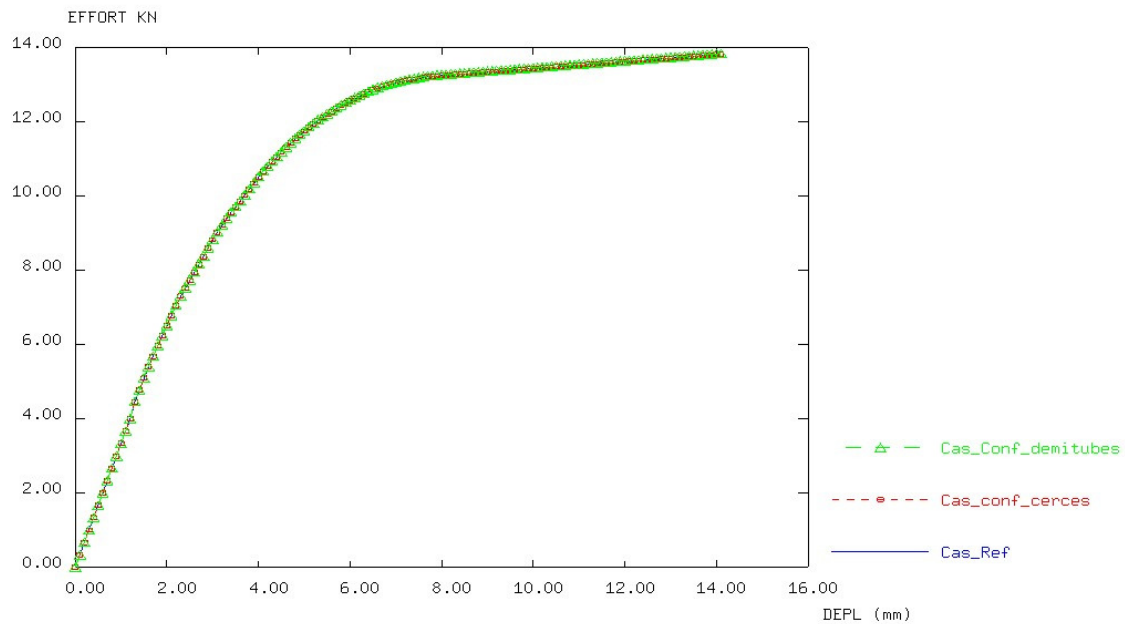
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	6.67E-01	2.67E+00	5.41E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	6.67E-01	2.67E+00	5.41E+00	9.23E+00	1.28E+01	1.37E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 12.81/12.80 = 100.04%

cas (4)/cas (2) = 12.83/12.81 = 100.20%

Epreuve où L= 40mm - H= 57mm 0.0093



valeurs filtrées du graphique.

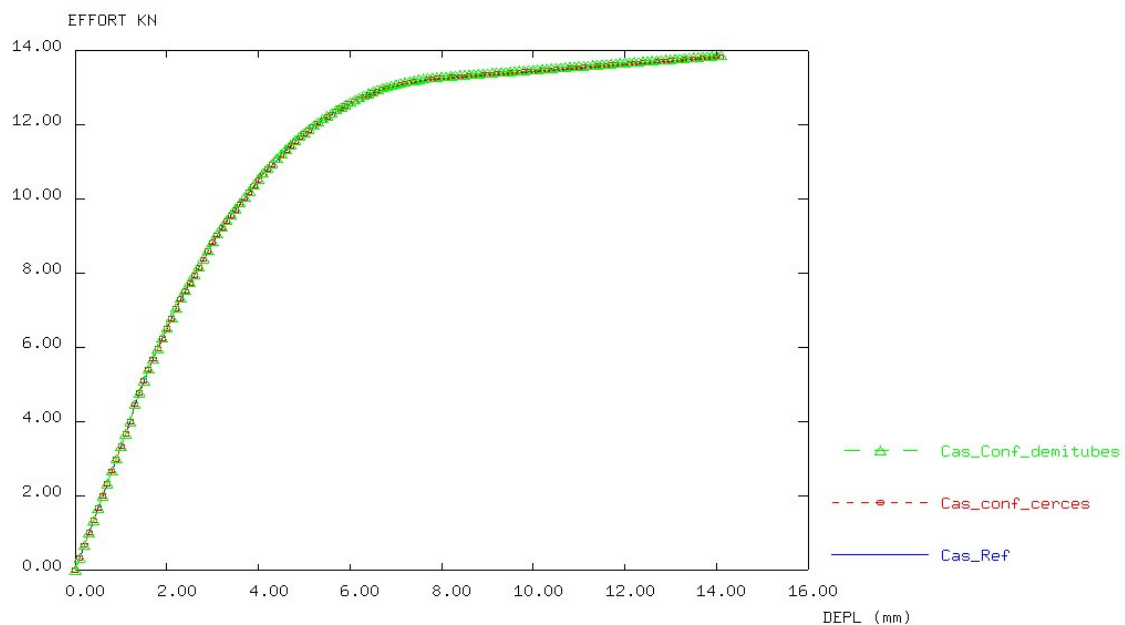
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	6.68E-01	2.67E+00	5.41E+00	9.22E+00	1.28E+01	1.37E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	6.68E-01	2.67E+00	5.42E+00	9.25E+00	1.29E+01	1.38E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 12.81/12.80 = 100.08%

cas (4)/cas (2) = 12.86/12.81 = 100.41%

Epreuve où L= 60mm - H= 57mm 0.0139:



valeurs filtrées du graphique.

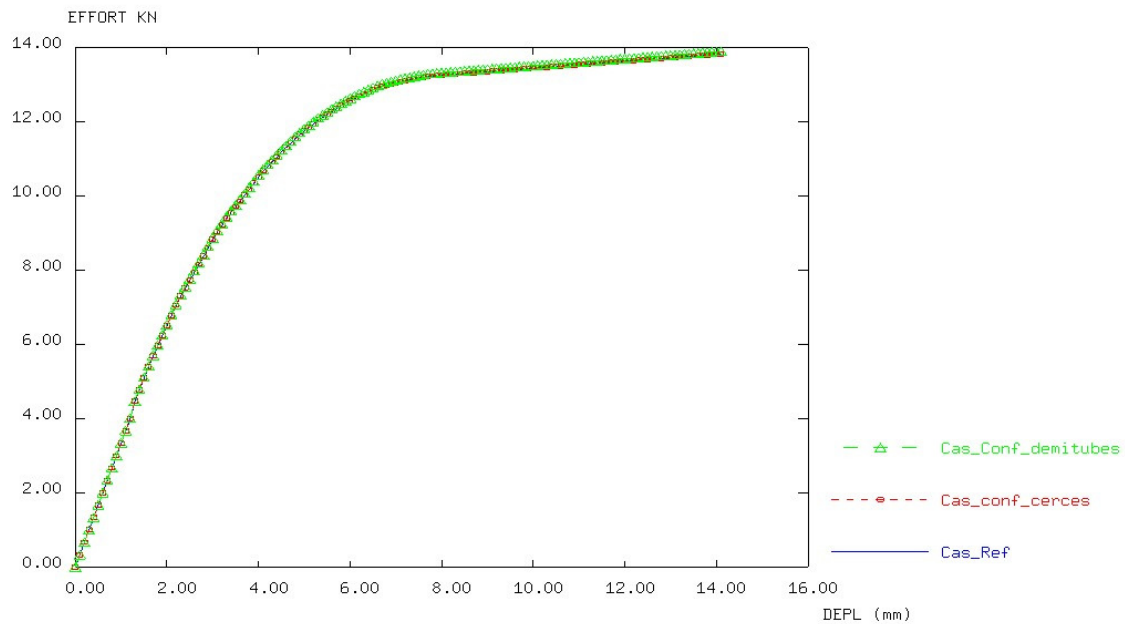
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	6.69E-01	2.67E+00	5.42E+00	9.23E+00	1.28E+01	1.37E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	6.69E-01	2.68E+00	5.43E+00	9.26E+00	1.29E+01	1.38E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 12.82/12.80 = 100.12%

cas (4)/cas (2) = 12.88/12.82 = 100.61%

Epreuve où L= 80mm - H= 57mm 0.0185:



valeurs filtrées du graphique.

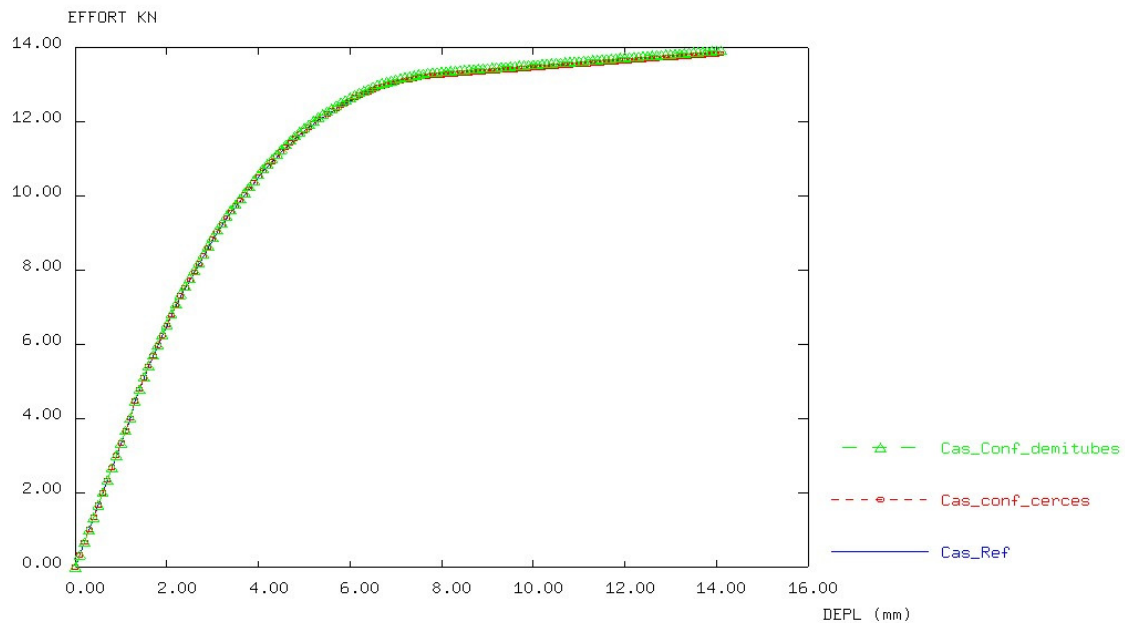
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	6.70E-01	2.68E+00	5.42E+00	9.23E+00	1.28E+01	1.37E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	6.70E-01	2.68E+00	5.44E+00	9.28E+00	1.29E+01	1.38E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 12.82/12.80 = 100.17%

cas (4)/cas (2) = 12.91/12.82 = 100.81%

Epreuve où L= 100mm - H= 57mm 0.0232



valeurs filtrées du graphique.

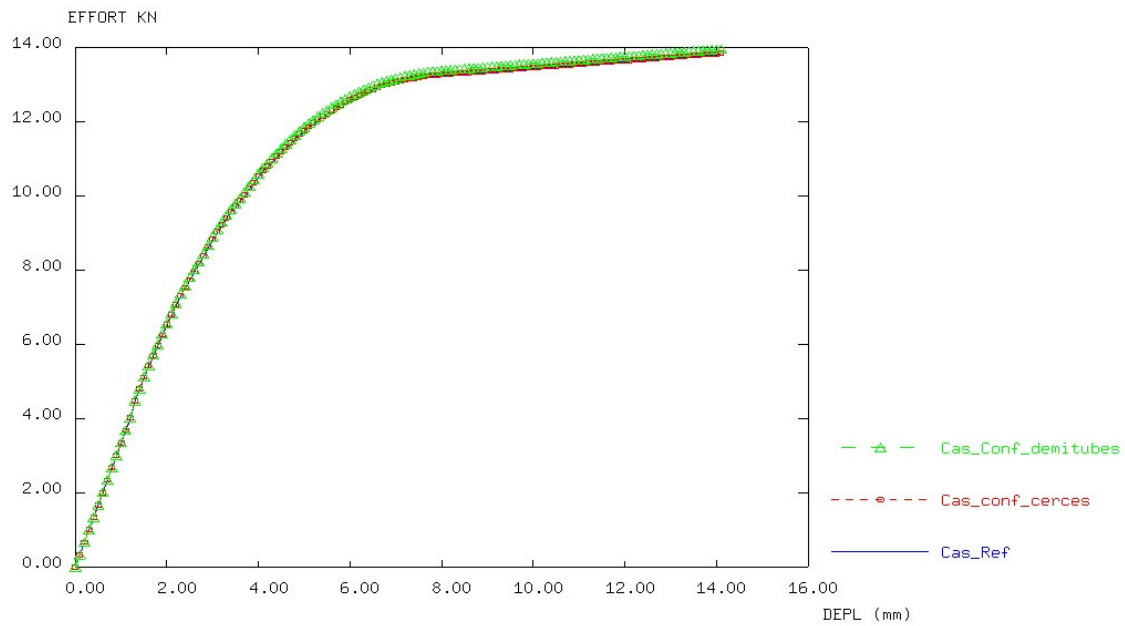
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	6.70E-01	2.68E+00	5.43E+00	9.24E+00	1.28E+01	1.37E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	6.71E-01	2.68E+00	5.44E+00	9.30E+00	1.29E+01	1.38E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 12.83/12.80 = 100.21%

cas (4)/cas (2) = 12.93/12.83 = 101.02%

Epreuve où L= 120mm - H= 57mm 0.0278:



valeurs filtrées du graphique.

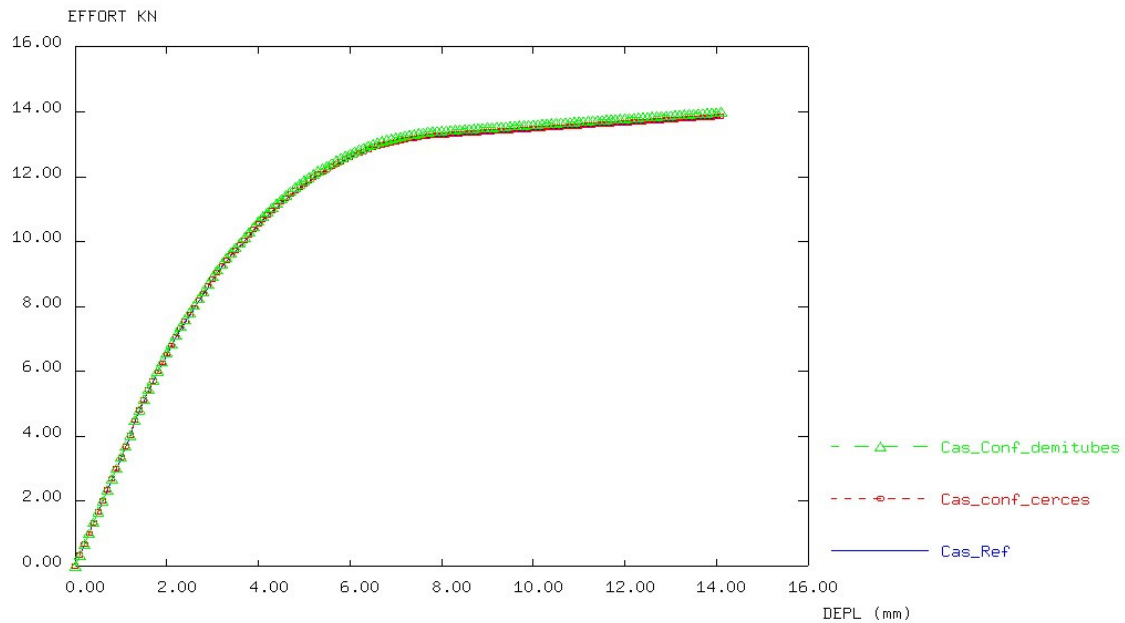
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN]poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN]avec cerces	0.00E+00	6.71E-01	2.68E+00	5.43E+00	9.24E+00	1.28E+01	1.37E+01
4	Effort [KN]avec cerces et demi tubes	0.00E+00	6.73E-01	2.69E+00	5.45E+00	9.32E+00	1.30E+01	1.39E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 12.84/12.80 = 100.25%

cas (4)/cas (2) = 12.96/12.84 = 101.22%

Epreuve où L= 140mm - H= 57mm 0.0324:



valeurs filtrées du graphique.

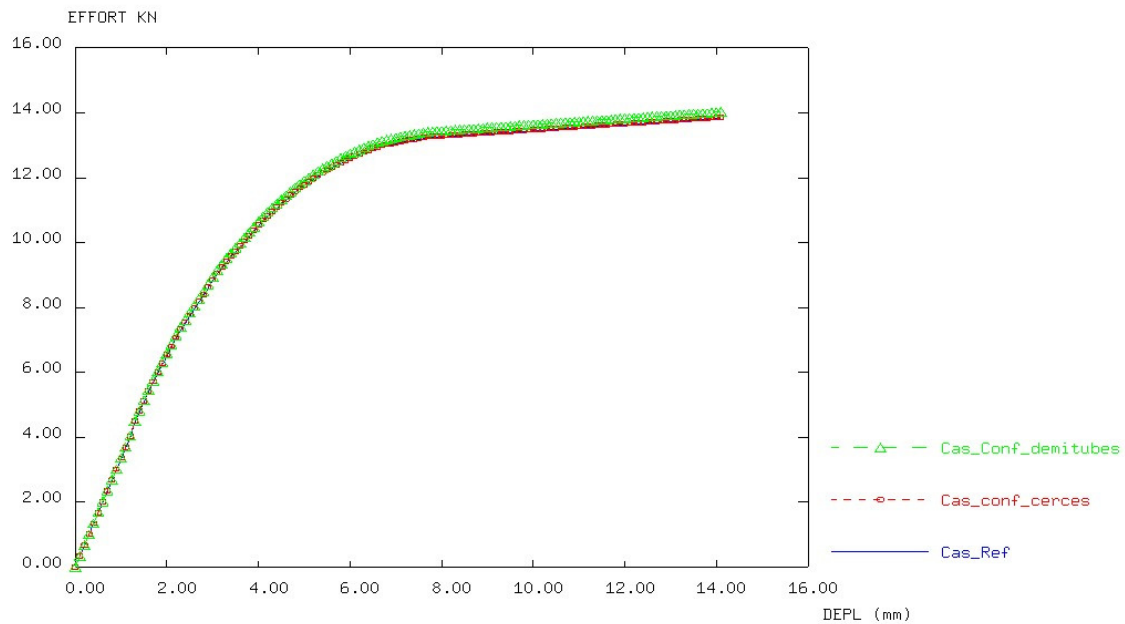
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN]poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN]avec cerces	0.00E+00	6.72E-01	2.69E+00	5.44E+00	9.25E+00	1.28E+01	1.37E+01
4	Effort [KN]avec cerces et demi tubes	0.00E+00	6.74E-01	2.69E+00	5.46E+00	9.34E+00	1.30E+01	1.39E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 12.84/12.80 = 100.29%

cas (4)/cas (2) = 12.98/12.84 = 101.42%

Epreuve où L= 160mm - H= 57mm 0.0371:

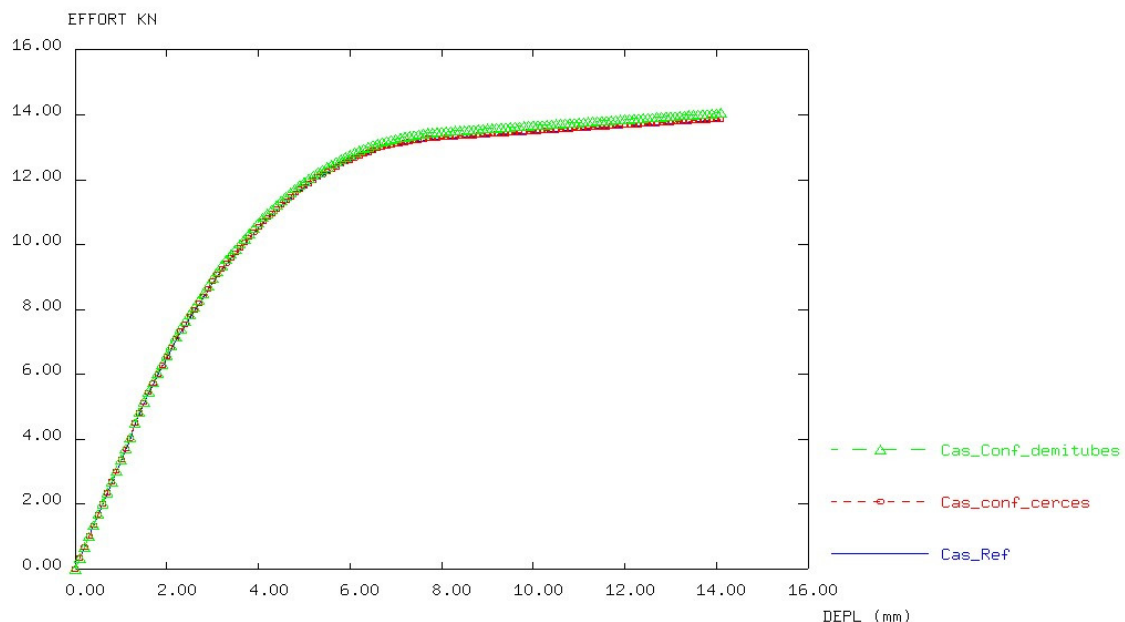


valeurs filtrées du graphique.

1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	6.73E-01	2.69E+00	5.44E+00	9.25E+00	1.28E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	6.75E-01	2.70E+00	5.47E+00	9.36E+00	1.30E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence
cas (3)/cas (2) = 12.85/12.80 = 100.33%
cas (4)/cas (2) = 13.01/12.85 = 101.63%

Epreuve où L= 180mm - H= 57mm 0.0417:

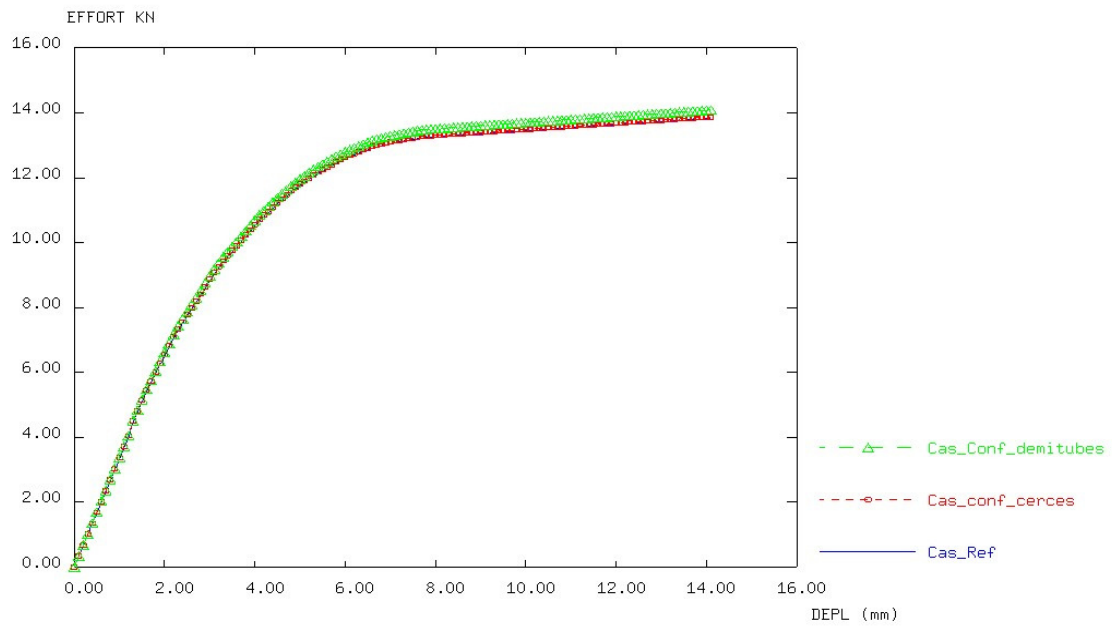


valeurs filtrées du graphique.

1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	6.74E-01	2.70E+00	5.45E+00	9.26E+00	1.29E+01	1.38E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	6.76E-01	2.70E+00	5.48E+00	9.37E+00	1.30E+01	1.40E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence
cas (3)/cas (2) = 12.85/12.80 = 100.38%
cas (4)/cas (2) = 13.04/12.85 = 101.83%

Epreuve où L= 200mm - H= 57mm 0.0463:



valeurs filtrées du graphique.

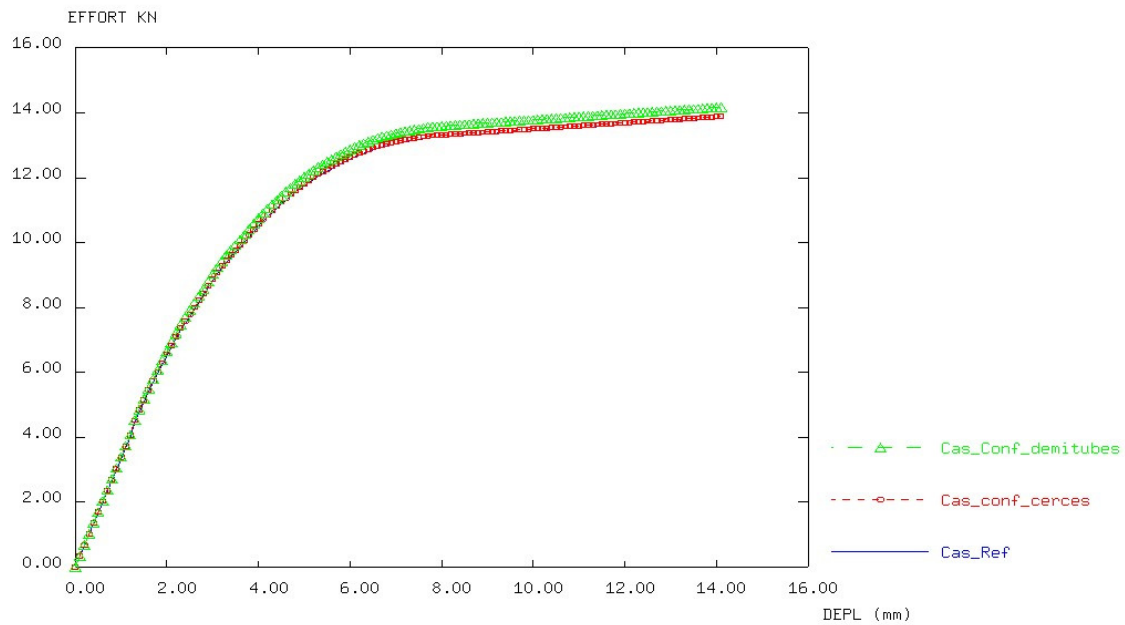
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	6.75E-01	2.70E+00	5.46E+00	9.26E+00	1.29E+01	1.38E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	6.77E-01	2.71E+00	5.49E+00	9.39E+00	1.31E+01	1.40E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 12.86/12.80 = 100.42%

cas (4)/cas (2) = 13.06/12.86 = 102.03%

Epreuve où L= 220mm - H= 57mm 0.051:



valeurs filtrées du graphique.

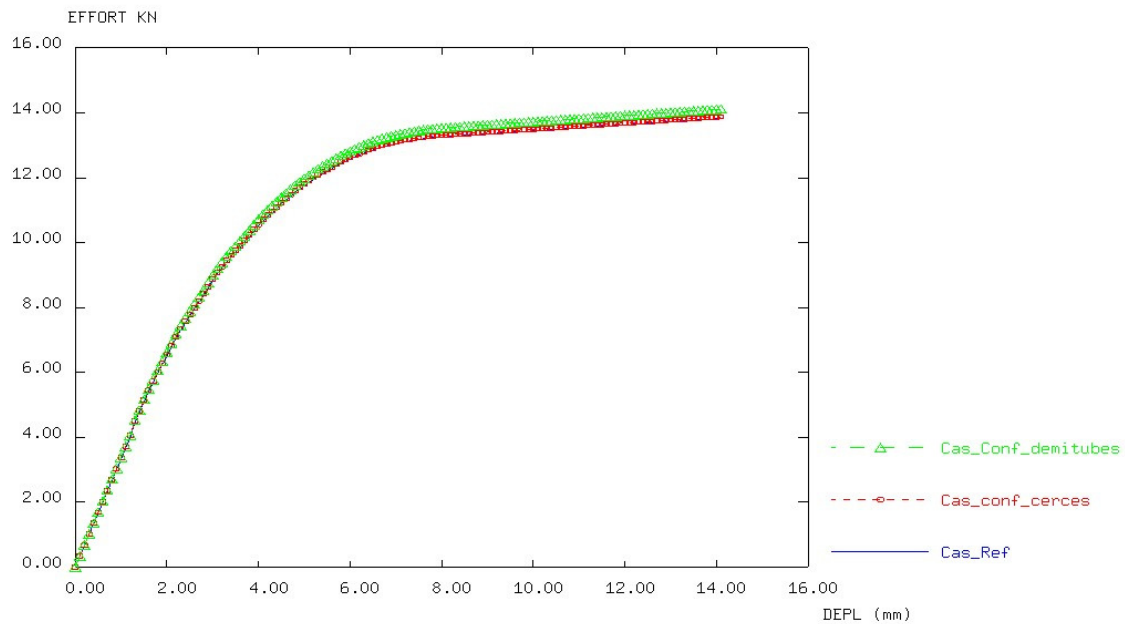
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	6.78E-01	2.71E+00	5.47E+00	9.28E+00	1.29E+01	1.38E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	6.80E-01	2.72E+00	5.51E+00	9.45E+00	1.31E+01	1.41E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 12.87/12.80 = 100.54%

cas (4)/cas (2) = 13.14/12.87 = 102.64%

Epreuve où L= 240mm - H= 57mm 0.0556:



valeurs filtrées du graphique.

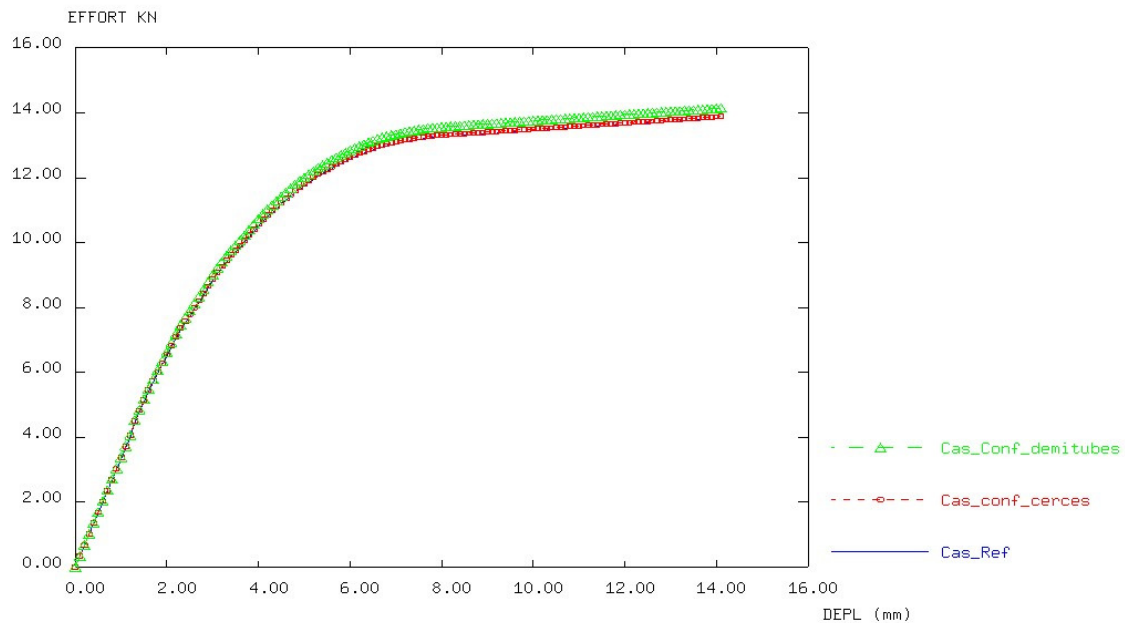
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	6.76E-01	2.70E+00	5.46E+00	9.27E+00	1.29E+01	1.38E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	6.78E-01	2.71E+00	5.49E+00	9.41E+00	1.31E+01	1.40E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 12.86/12.80 = 100.46%

cas (4)/cas (2) = 13.09/12.86 = 102.23%

Epreuve où L= 260mm - H= 57mm 0.0602:



valeurs filtrées du graphique.

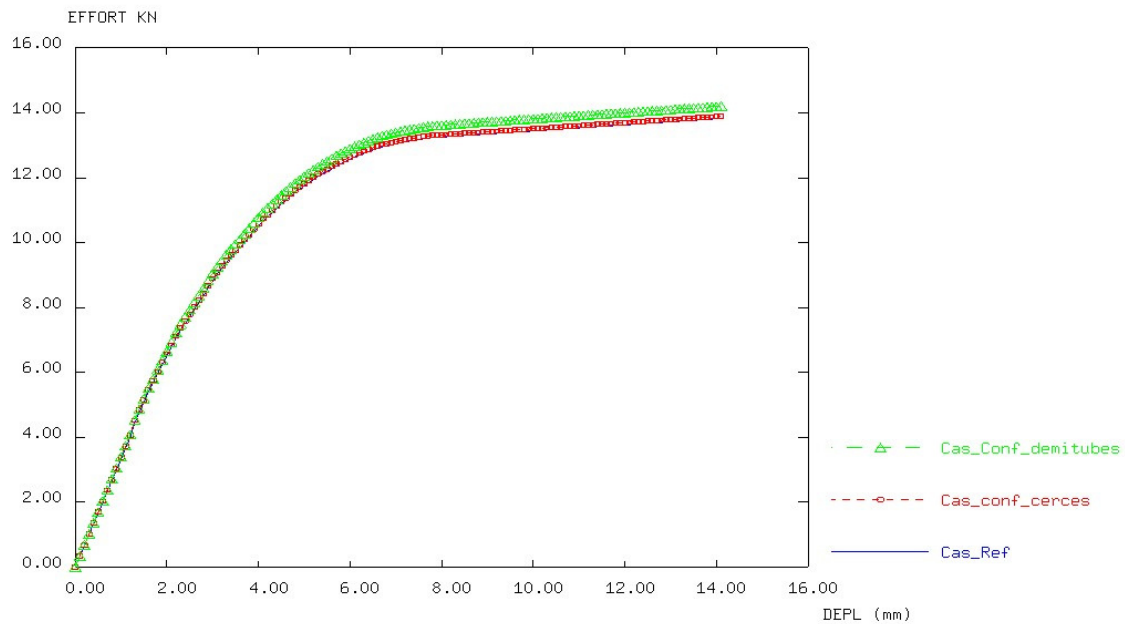
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	6.77E-01	2.71E+00	5.47E+00	9.27E+00	1.29E+01	1.38E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	6.79E-01	2.72E+00	5.50E+00	9.43E+00	1.31E+01	1.41E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 12.87/12.80 = 100.50%

cas (4)/cas (2) = 13.11/12.87 = 102.44%

Epreuve où L= 280mm - H= 57mm 0.0648:



valeurs filtrées du graphique.

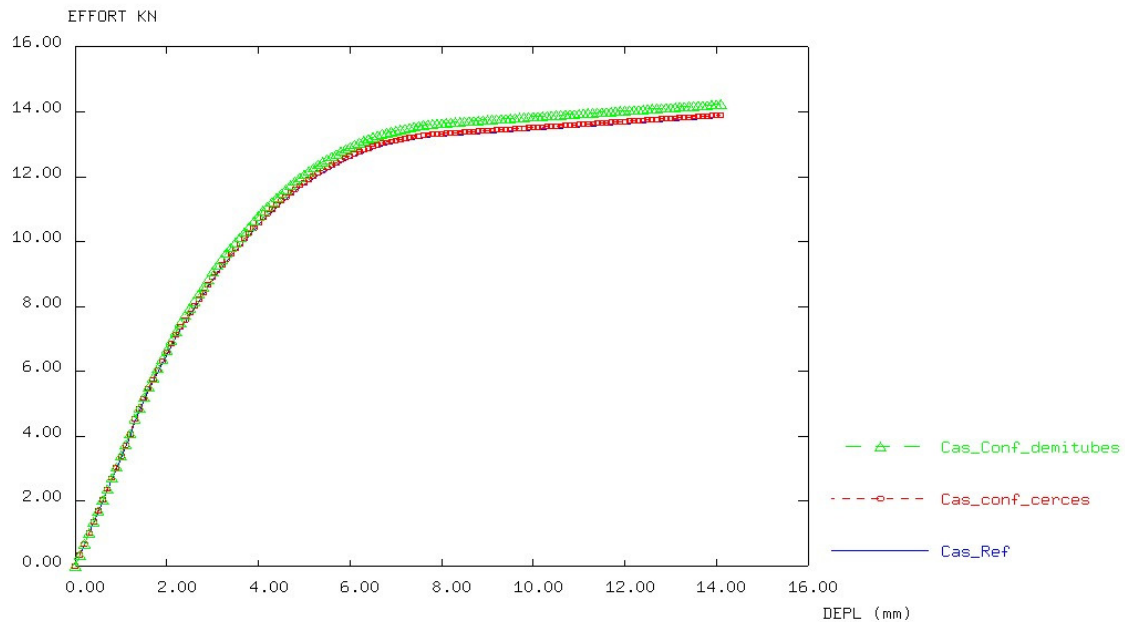
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	6.78E-01	2.71E+00	5.48E+00	9.28E+00	1.29E+01	1.38E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	6.81E-01	2.72E+00	5.52E+00	9.46E+00	1.32E+01	1.41E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 12.88/12.80 = 100.58%

cas (4)/cas (2) = 13.17/12.88 = 102.84%

Epreuve où L= 300mm - H= 57mm 0.0695:



valeurs filtrées du graphique.

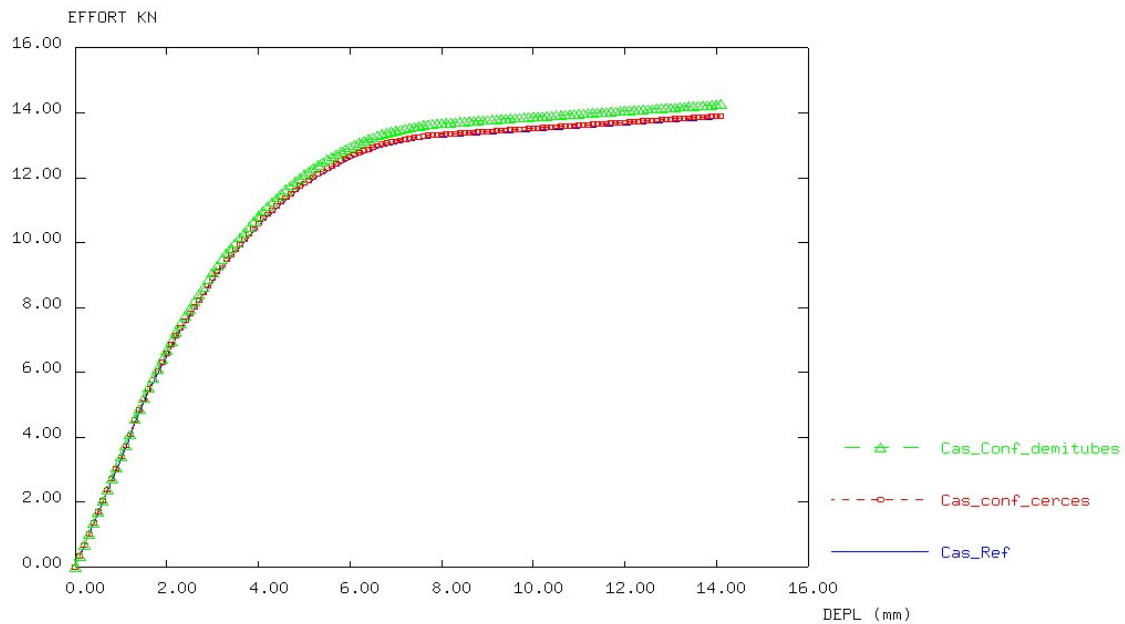
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	6.79E-01	2.72E+00	5.48E+00	9.29E+00	1.29E+01	1.38E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	6.82E-01	2.73E+00	5.53E+00	9.48E+00	1.32E+01	1.41E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 12.88/12.80 = 100.63%

cas (4)/cas (2) = 13.19/12.88 = 103.05%

Epreuve où L= 320mm - H= 57mm 0.0741:



valeurs filtrées du graphique.

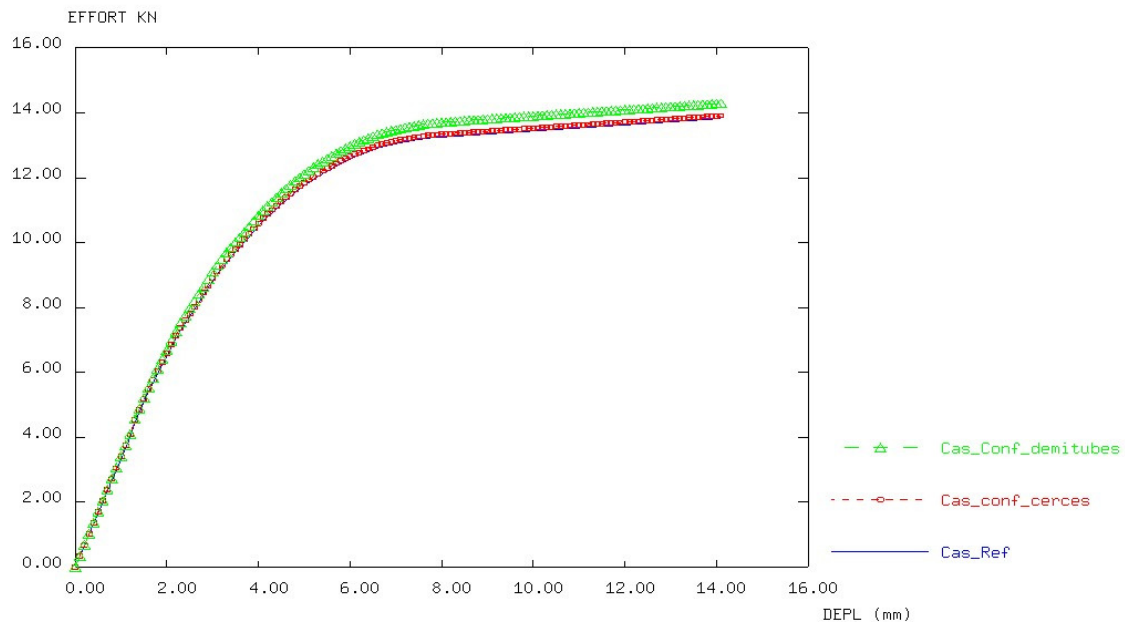
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	6.80E-01	2.72E+00	5.49E+00	9.29E+00	1.29E+01	1.38E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	6.83E-01	2.73E+00	5.54E+00	9.50E+00	1.32E+01	1.42E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 12.89/12.80 = 100.67%

cas (4)/cas (2) = 13.22/12.89 = 103.25%

Epreuve où L= 340mm - H= 57mm 0.2884:



valeurs filtrées du graphique.

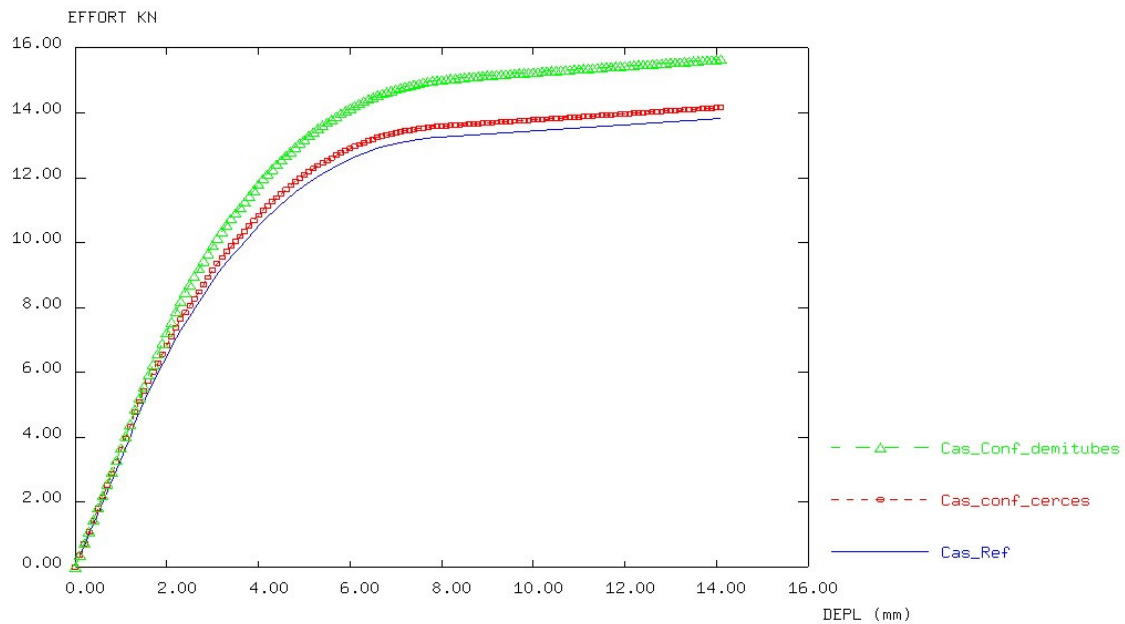
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	7.21E-01	2.88E+00	5.73E+00	9.54E+00	1.31E+01	1.40E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	7.34E-01	2.93E+00	5.92E+00	1.03E+01	1.44E+01	1.55E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.14/12.80 = 102.60%

cas (4)/cas (2) = 14.42/13.14 = 112.64%

Epreuve où L= 360mm - H= 57mm 0.4539:



valeurs filtrées du graphique.

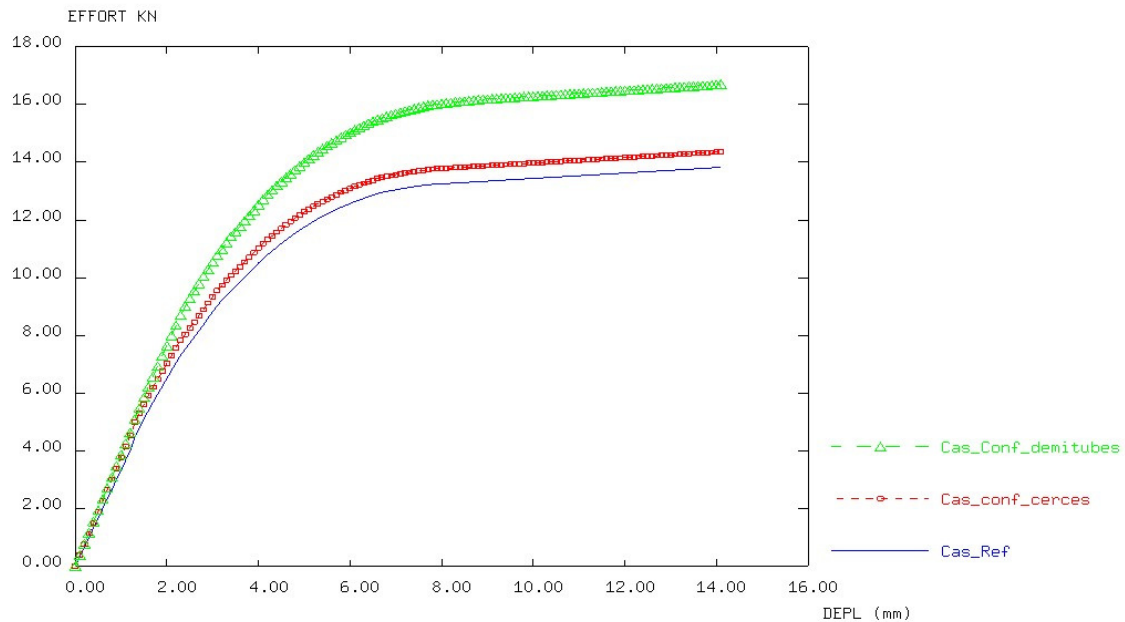
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	7.53E-01	3.01E+00	5.93E+00	9.73E+00	1.33E+01	1.42E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	7.73E-01	3.09E+00	6.22E+00	1.10E+01	1.53E+01	1.66E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.33/12.80 = 104.09%

cas (4)/cas (2) = 15.35/13.33 = 119.89%

Epreuve où L= 380mm - H= 57mm 0.5884:



valeurs filtrées du graphique.

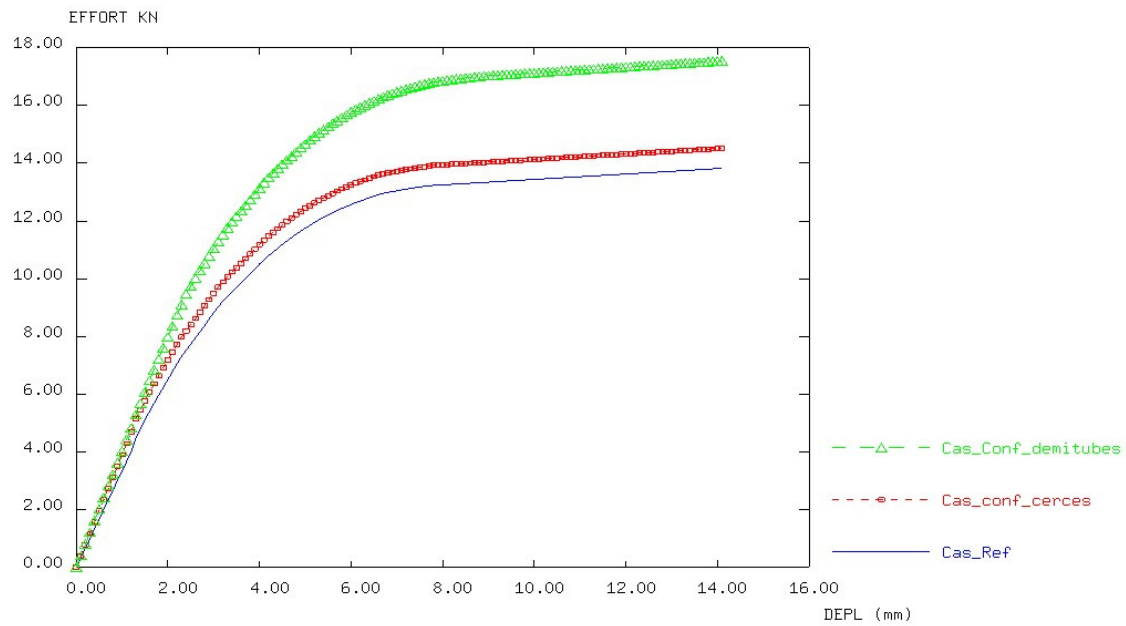
Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	7.79E-01	3.11E+00	6.08E+00	9.89E+00	1.35E+01	1.44E+01
Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.04E-01	3.22E+00	6.47E+00	1.15E+01	1.61E+01	1.74E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.48/12.80 = 105.30%

cas (4)/cas (2) = 16.10/13.48 = 125.78%

Epreuve où L= 400mm - H= 57mm 0.6967:



valeurs filtrées du graphique.

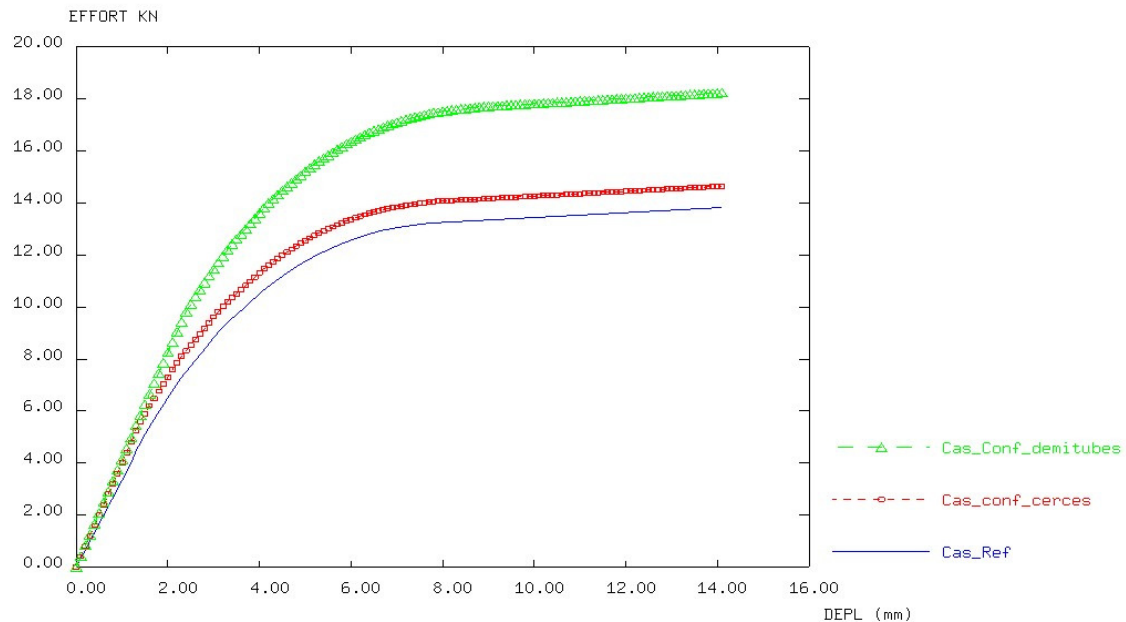
Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.00E-01	3.20E+00	6.21E+00	1.00E+01	1.36E+01	1.45E+01
Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.30E-01	3.32E+00	6.66E+00	1.20E+01	1.67E+01	1.81E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.61/12.80 = 106.27%

cas (4)/cas (2) = 16.71/13.61 = 130.53%

Epreuve où L= 420mm - H= 57mm 0.7826:



valeurs filtrées du graphique.

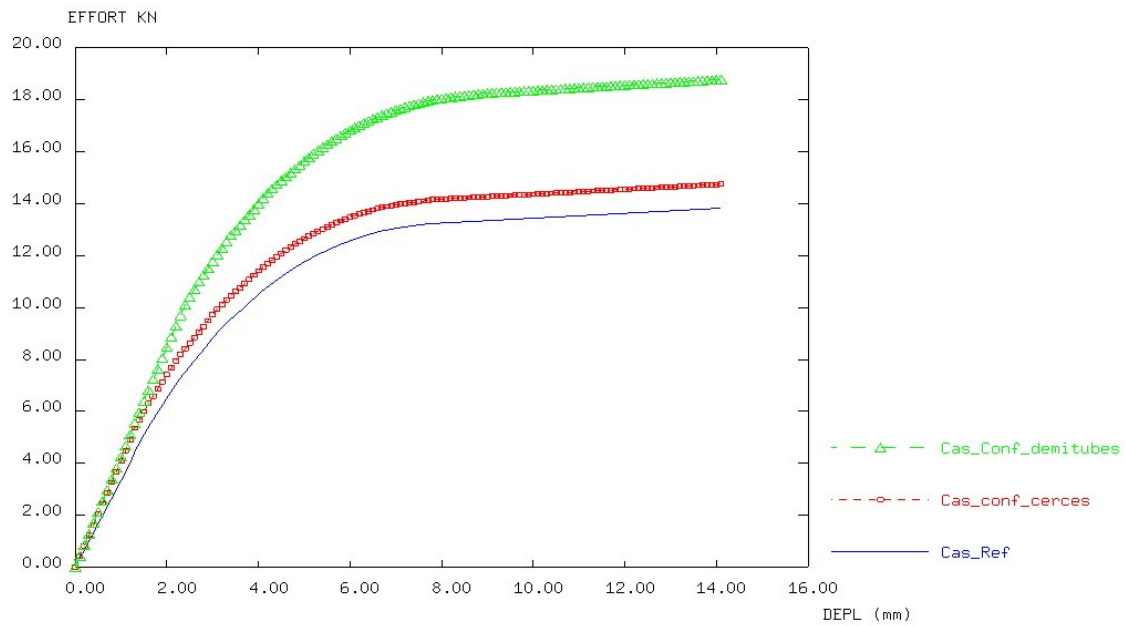
Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.16E-01	3.26E+00	6.30E+00	1.01E+01	1.37E+01	1.46E+01
Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.50E-01	3.40E+00	6.82E+00	1.23E+01	1.72E+01	1.87E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.71/12.80 = 107.05%

cas (4)/cas (2) = 17.19/13.71 = 134.29%

Epreuve où L= 440mm - H= 57mm 0.8496:



valeurs filtrées du graphique.

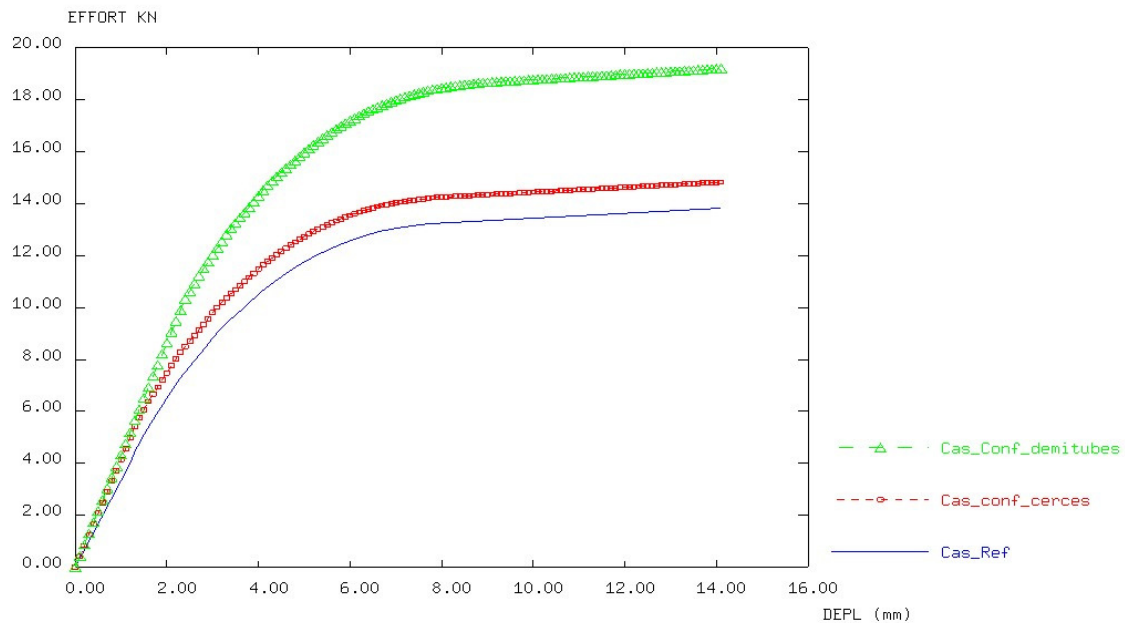
Deplacement (mm)	0.00E+00	1.00E-01	7.00E-01	1.50E+00	3.10E+00	6.30E+00	1.27E+01
Effort[KN]poutre réf	0.00E+00	3.33E-01	2.33E+00	5.09E+00	9.03E+00	1.27E+01	1.37E+01
Effort[KN]avec cerces	0.00E+00	4.15E-01	2.90E+00	6.07E+00	1.00E+01	1.37E+01	1.47E+01
Effort[KN]avec cerces et demi tubes	0.00E+00	4.33E-01	3.03E+00	6.51E+00	1.23E+01	1.75E+01	1.91E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.73/12.75 = 107.68%

cas (4)/cas (2) = 17.48/13.73 = 137.10%

Epreuve où L= 460mm - H= 57mm 0.9005:



valeurs filtrées du graphique.

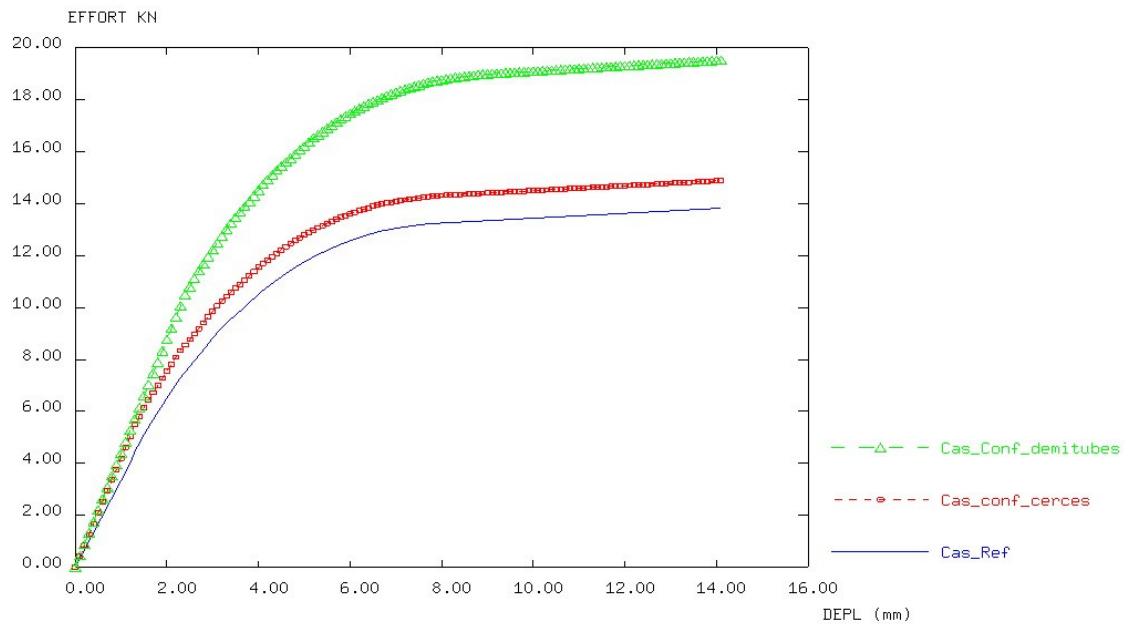
Deplacement (mm)	0.00E+00	1.00E-01	7.00E-01	1.50E+00	3.10E+00	6.30E+00	1.27E+01
Effort[KN]poutre réf	0.00E+00	3.33E-01	2.33E+00	5.09E+00	9.03E+00	1.27E+01	1.37E+01
Effort[KN]avec cerces	0.00E+00	4.19E-01	2.94E+00	6.13E+00	1.01E+01	1.38E+01	1.48E+01
Effort[KN]avec cerces et demi tubes	0.00E+00	4.39E-01	3.07E+00	6.59E+00	1.25E+01	1.78E+01	1.94E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.79/12.75 = 108.14%

cas (4)/cas (2) = 17.76/13.79 = 139.32%

Epreuve où L= 480mm - H= 57mm 0.9376:



valeurs filtrées du graphique.

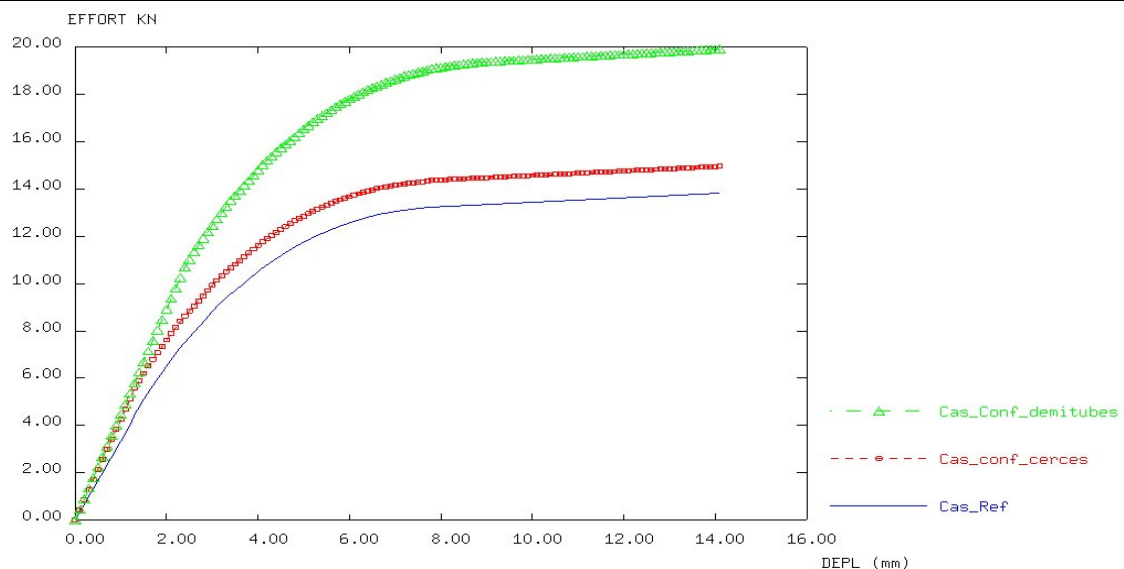
Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	2.00E-01
Effort [KN]poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	6.66E-01
Effort [KN]avec cerces	0.00E+00	8.78E-01	3.51E+00	7.03E+00	1.28E+01	1.79E+01	8.46E-01
Effort [KN]avec cerces et demi tubes	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.86E-01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 17.85/12.80 = 139.46%

cas (4)/cas (2) = 0.00/17.85 = 0.00%

Epreuve où L= 500mm - H= 57mm 0.9632:



valeurs filtrées du graphique.

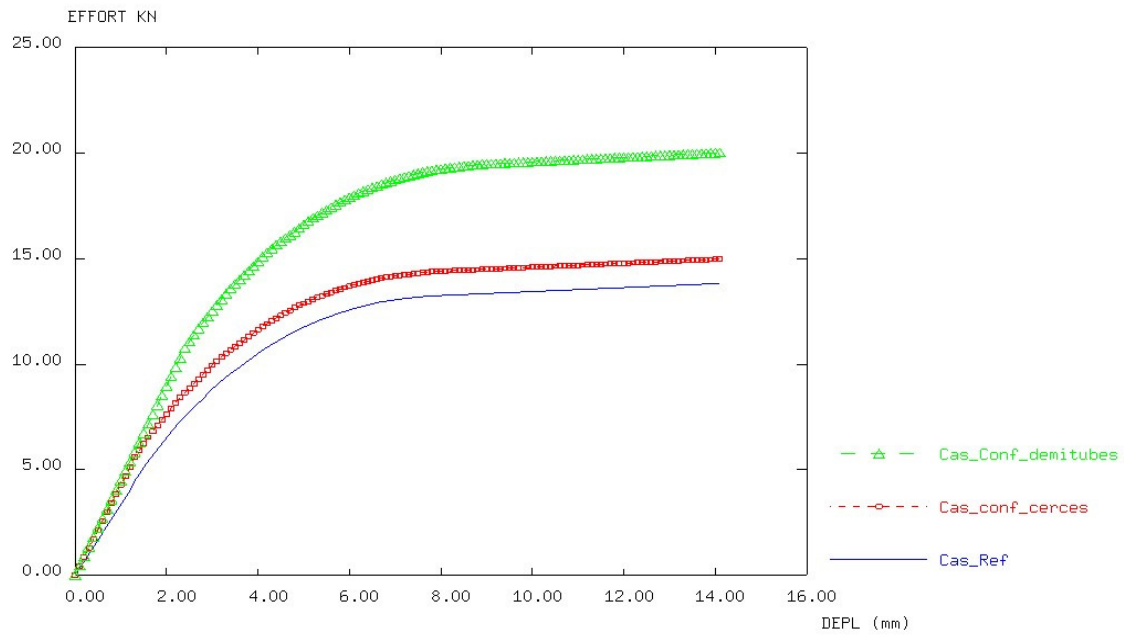
Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
Effort [KN]poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
Effort [KN]avec cerces	0.00E+00	8.51E-01	3.40E+00	6.51E+00	1.03E+01	1.39E+01	1.48E+01
Effort [KN]avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.92E-01	3.57E+00	7.14E+00	1.30E+01	1.82E+01	1.98E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.91/12.80 = 108.67%

cas (4)/cas (2) = 18.21/13.91 = 142.21%

Epreuve où L= 520mm - H= 57mm 0.9788:



valeurs filtrées du graphique.

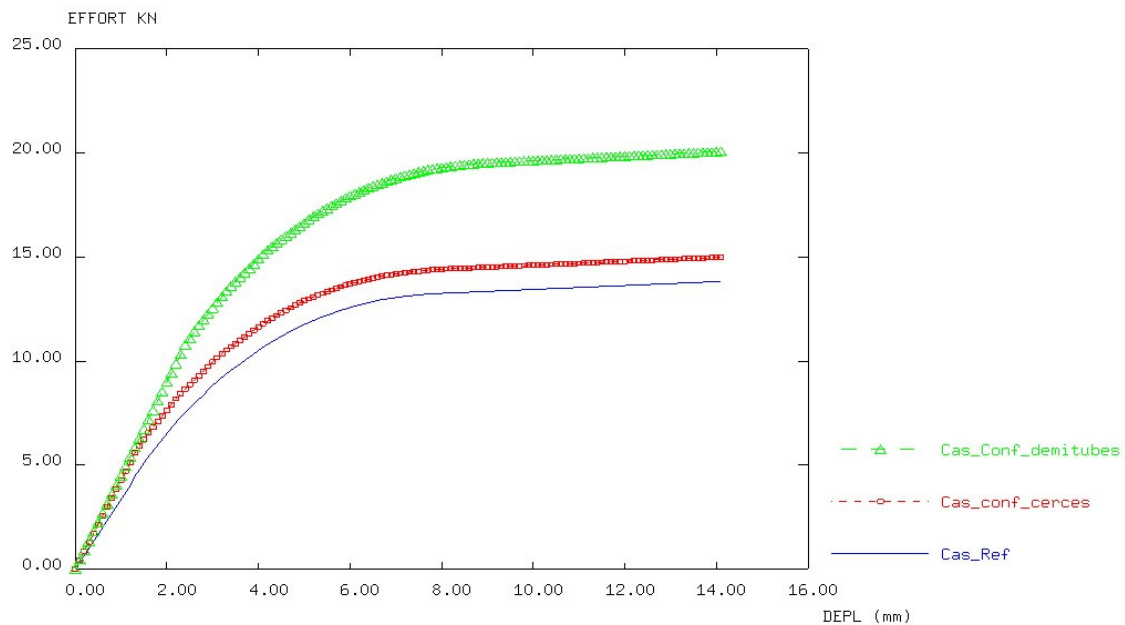
Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.54E-01	3.41E+00	6.53E+00	1.03E+01	1.39E+01	1.49E+01
Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.96E-01	3.59E+00	7.17E+00	1.31E+01	1.83E+01	1.99E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.93/12.80 = 108.82%

cas (4)/cas (2) = 18.29/13.93 = 142.89%

Epreuve où L= 540mm - H= 57mm 0.9862:



valeurs filtrées du graphique.

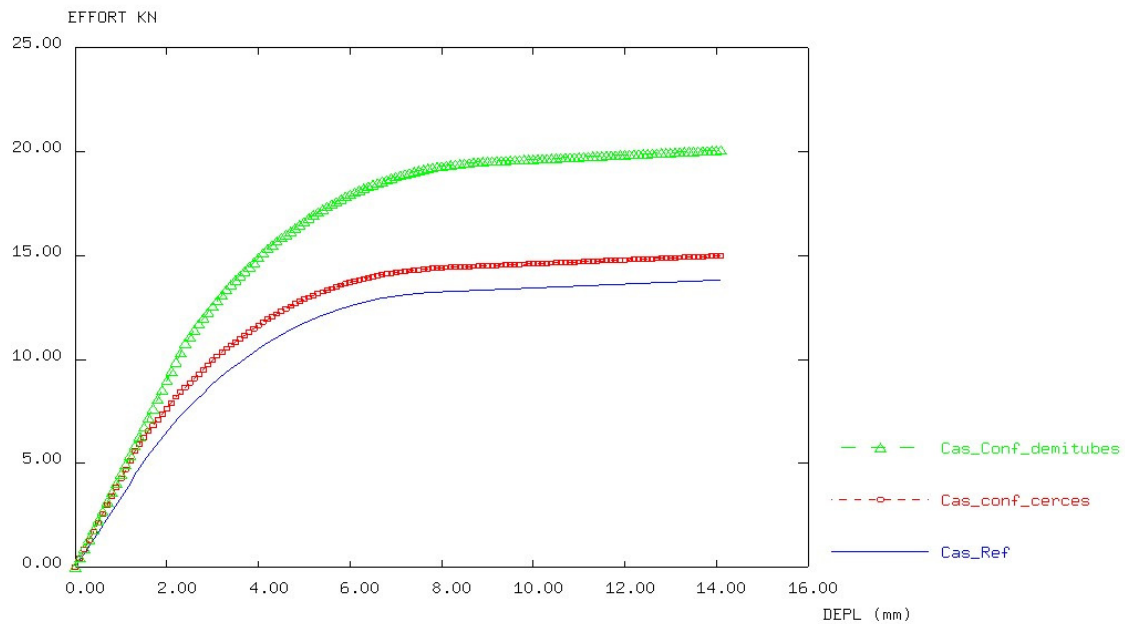
1 Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.55E-01	3.42E+00	6.54E+00	1.03E+01	1.39E+01	1.49E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.98E-01	3.59E+00	7.19E+00	1.31E+01	1.83E+01	1.99E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.94/12.80 = 108.88%

cas (4)/cas (2) = 18.34/13.94 = 143.21%

Epreuve où L= 545mm - H= 57mm 0.9869:



valeurs filtrées du graphique.

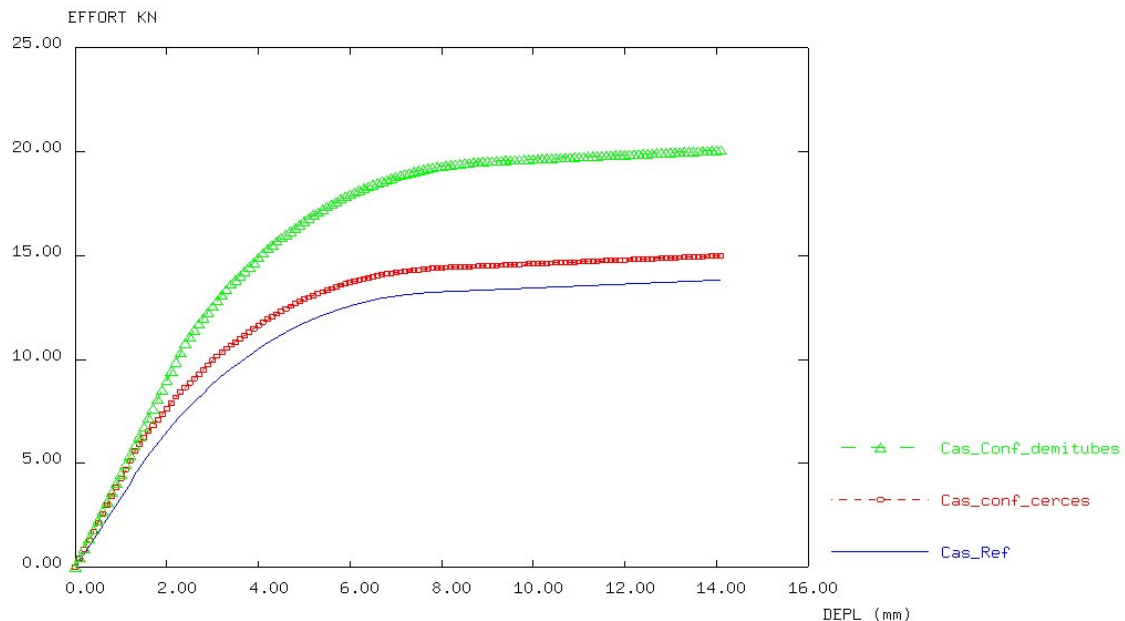
Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.55E-01	3.42E+00	6.54E+00	1.03E+01	1.39E+01	1.49E+01
Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.98E-01	3.59E+00	7.19E+00	1.31E+01	1.83E+01	1.99E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.94/12.80 = 108.89%

cas (4)/cas (2) = 18.34/13.94 = 143.24%

Epreuve où L= 550mm - H= 57mm 0.9872:



valeurs filtrées du graphique.

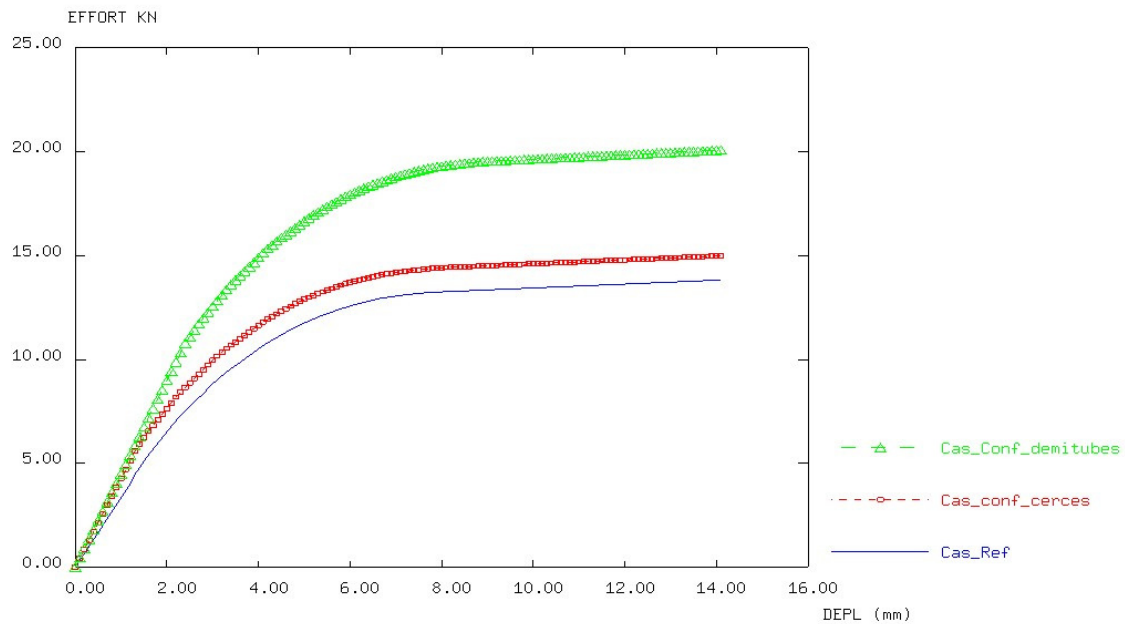
1 Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.56E-01	3.42E+00	6.54E+00	1.03E+01	1.39E+01	1.49E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.98E-01	3.59E+00	7.19E+00	1.31E+01	1.83E+01	1.99E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.94/12.80 = 108.89%

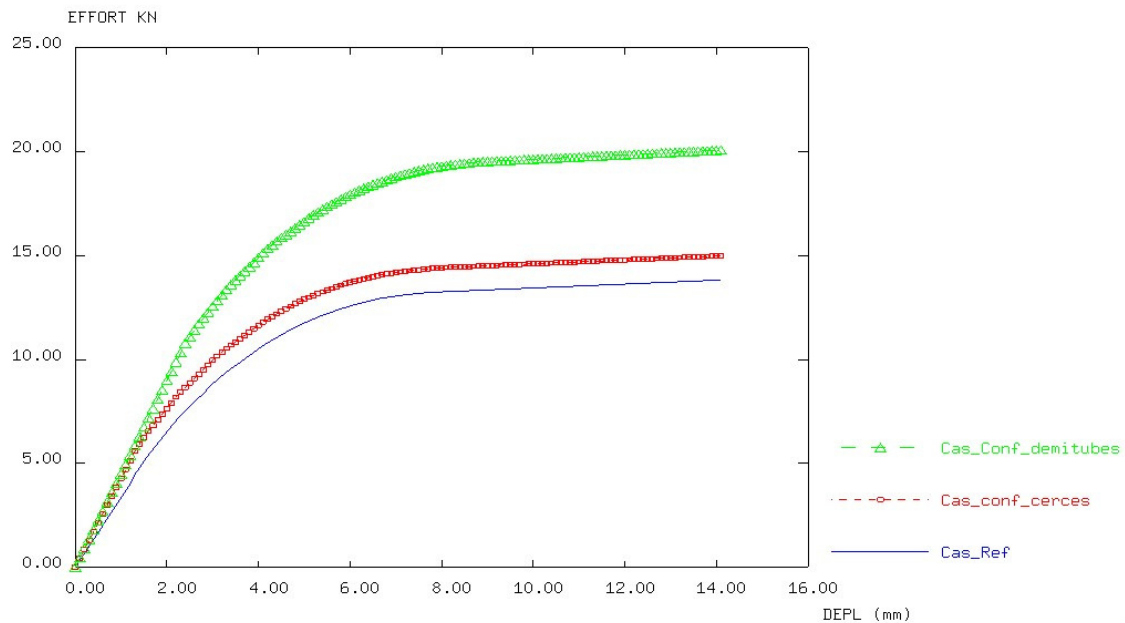
cas (4)/cas (2) = 18.34/13.94 = 143.26%

Epreuve où L= 555mm - H= 57mm 0.9871:



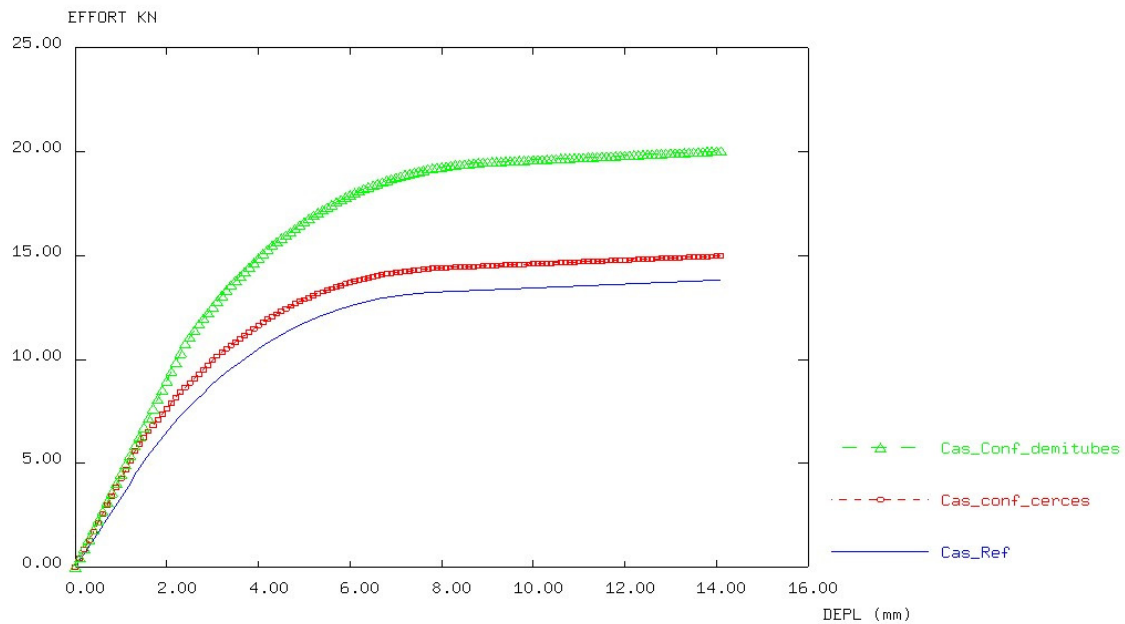
rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence
cas (3)/cas (2) = 13.94/12.80 = 108.89%
cas (4)/cas (2) = 18.34/13.94 = 143.25%

Epreuve où L= 560mm - H= 57mm 0.9866



rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence
cas (3)/cas (2) = 13.94/12.80 = 108.88%
cas (4)/cas (2) = 18.34/13.94 = 143.23%

Epreuve où L= 580mm - H= 57mm 0.9811:



valeurs filtrées du graphique.

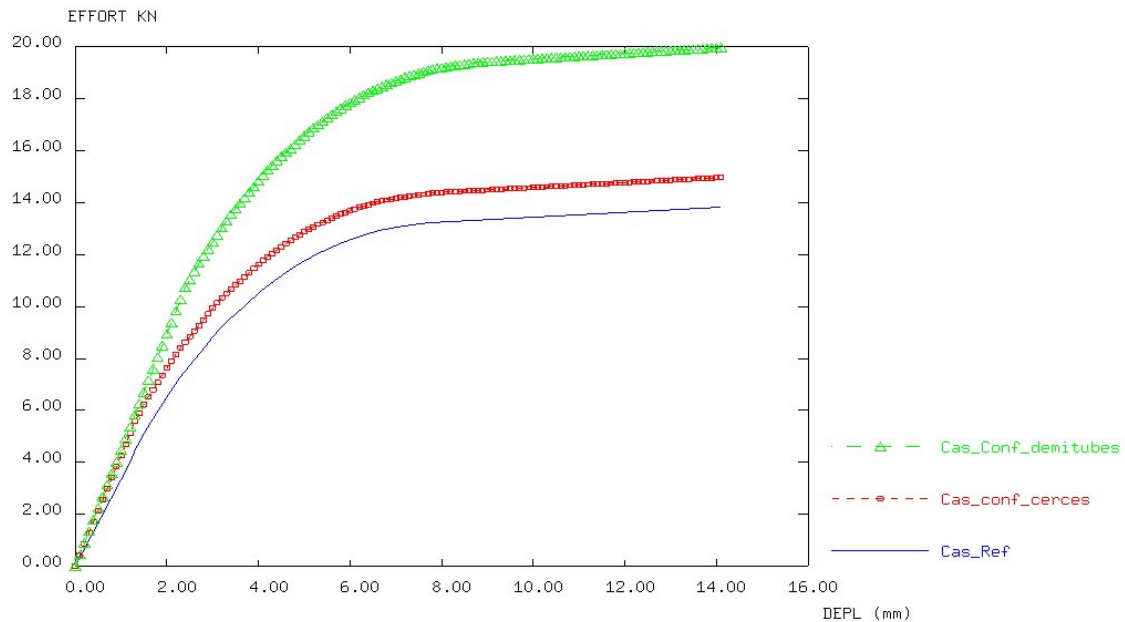
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.54E-01	3.42E+00	6.53E+00	1.03E+01	1.39E+01	1.49E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.97E-01	3.59E+00	7.18E+00	1.31E+01	1.83E+01	1.99E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.93/12.80 = 108.84%

cas (4)/cas (2) = 18.31/13.93 = 142.99%

Epreuve où L= 600mm - H= 57mm 0.9707:



valeurs filtrées du graphique.

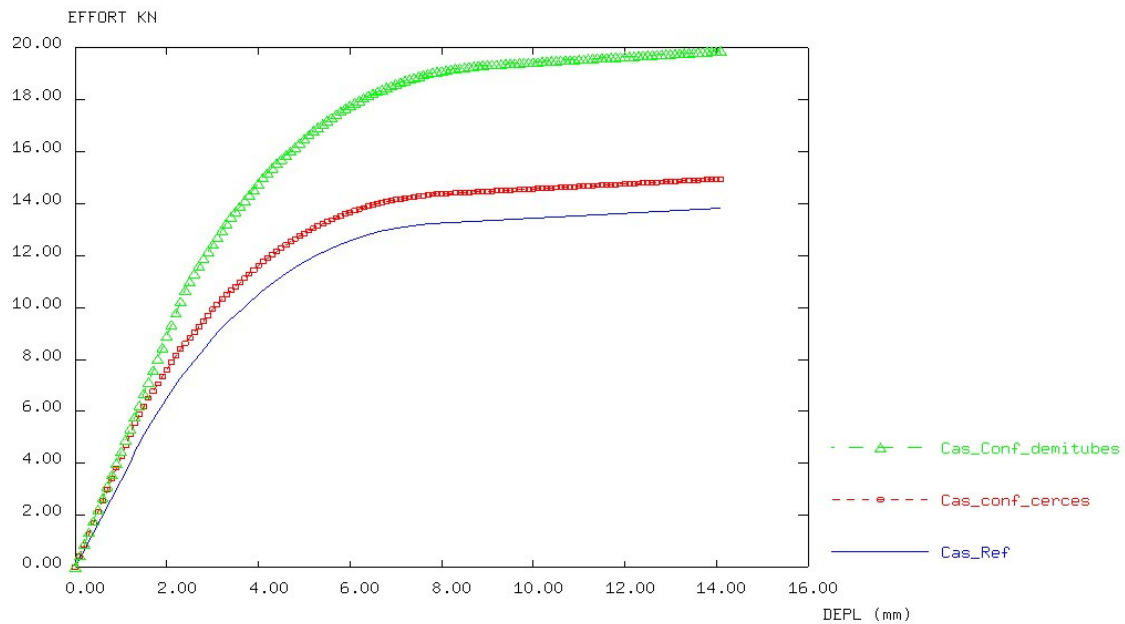
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.52E-01	3.41E+00	6.52E+00	1.03E+01	1.39E+01	1.48E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.94E-01	3.58E+00	7.16E+00	1.30E+01	1.82E+01	1.98E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.92/12.80 = 108.74%

cas (4)/cas (2) = 18.25/13.92 = 142.53%

Epreuve où L= 620mm - H= 57mm 0.9563:



valeurs filtrées du graphique.

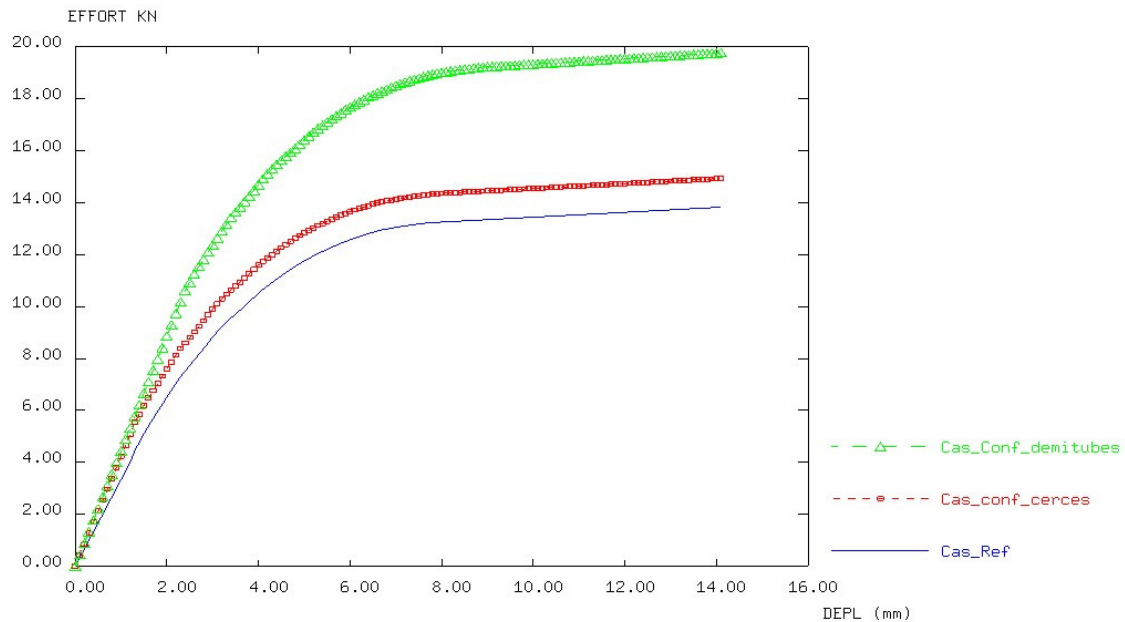
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.50E-01	3.40E+00	6.50E+00	1.03E+01	1.39E+01	1
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.91E-01	3.56E+00	7.13E+00	1.30E+01	1.82E+01	1

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.91/12.80 = 108.61%

cas (4)/cas (2) = 18.17/13.91 = 141.90%

Epreuve où L= 640mm - H= 57mm 0.9386:



valeurs filtrées du graphique.

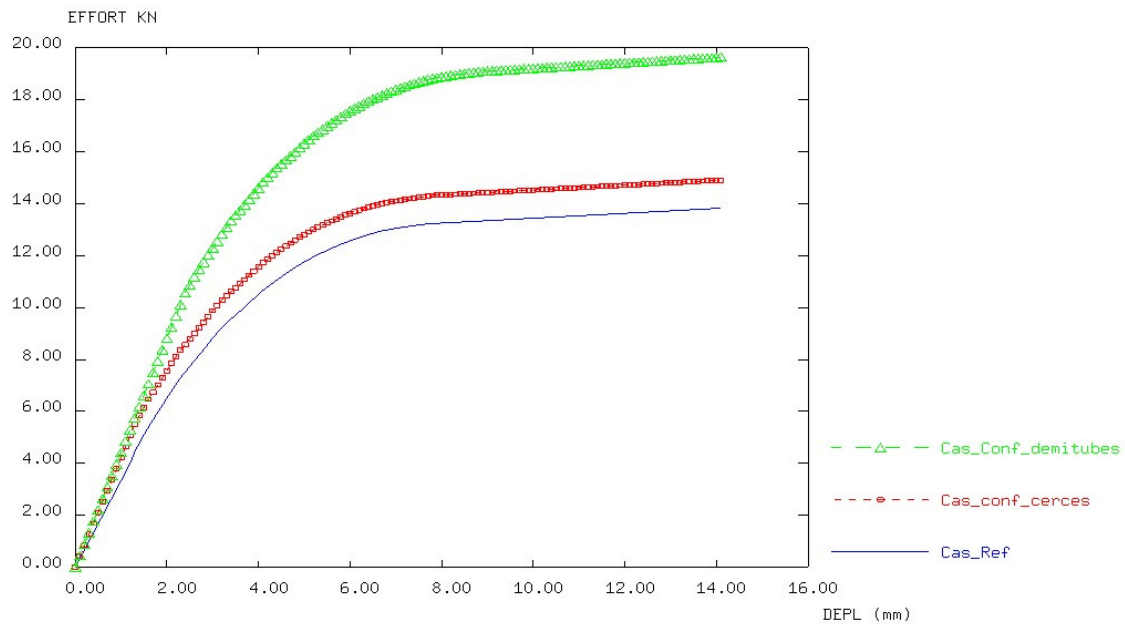
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.46E-01	3.38E+00	6.48E+00	1.03E+01	1.39E+01	1.48E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.87E-01	3.55E+00	7.10E+00	1.29E+01	1.81E+01	1.96E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.89/12.80 = 108.45%

cas (4)/cas (2) = 18.07/13.89 = 141.13%

Epreuve ou L= 660mm - H= 57mm 0.9182:



valeurs filtrées du graphique.

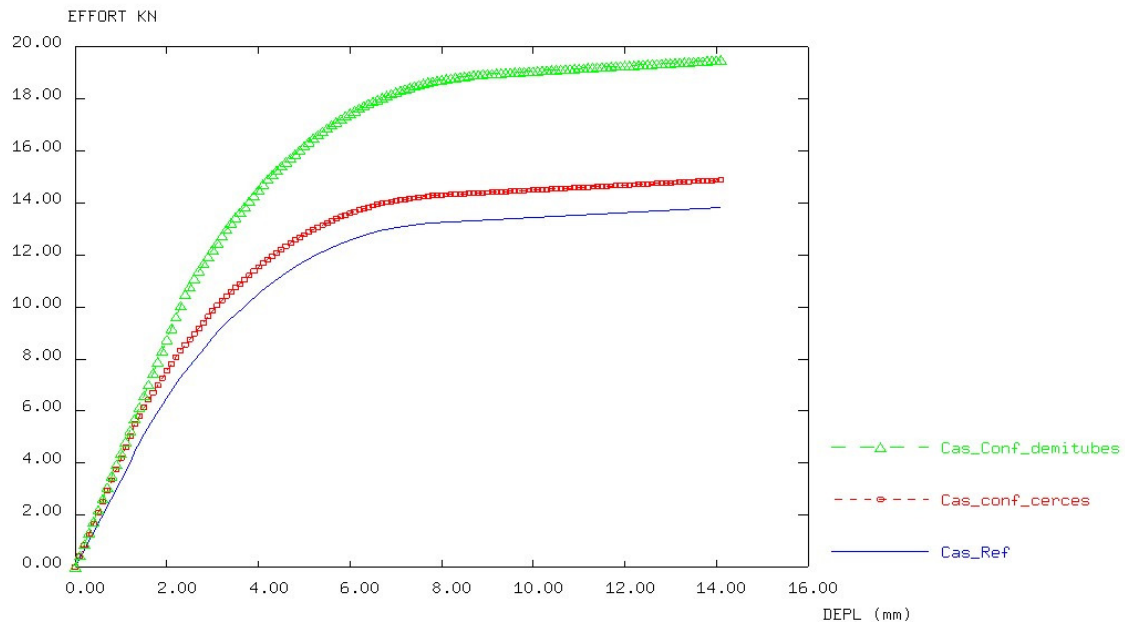
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.42E-01	3.37E+00	6.46E+00	1.03E+01	1.39E+01	1.48E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.82E-01	3.53E+00	7.06E+00	1.28E+01	1.80E+01	1.95E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.86/12.80 = 108.27%

cas (4)/cas (2) = 17.95/13.86 = 140.23%

Epreuve ou L= 680mm - H= 57mm 0.8956:



valeurs filtrées du graphique.

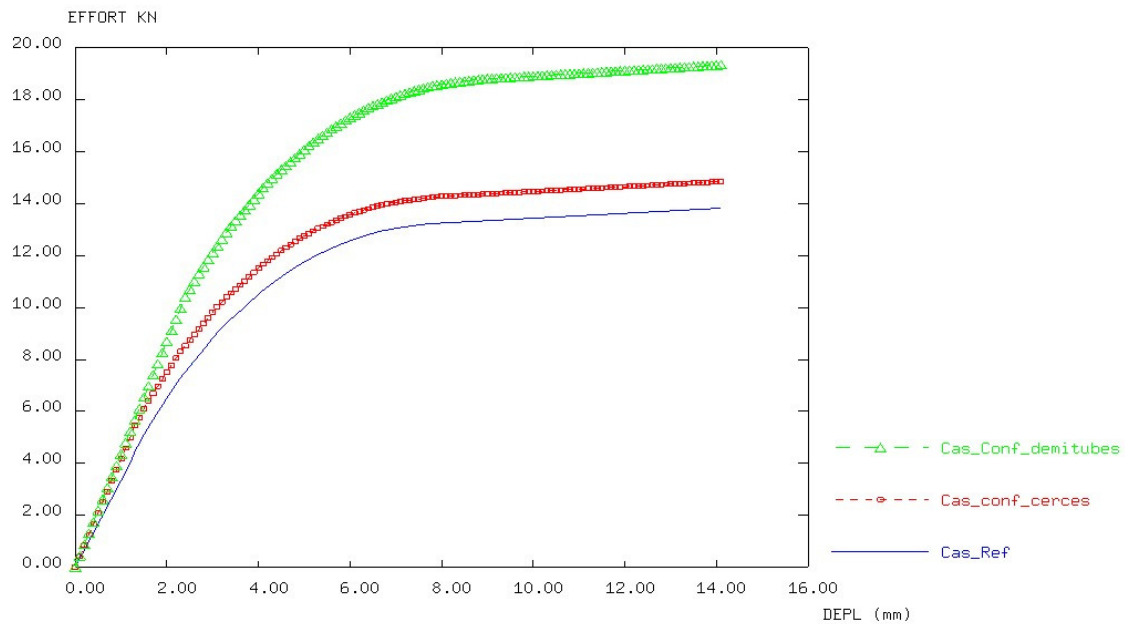
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.38E-01	3.35E+00	6.43E+00	1.02E+01	1.38E+01	1.48E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.76E-01	3.51E+00	7.02E+00	1.27E+01	1.78E+01	1.94E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.84/12.80 = 108.07%

cas (4)/cas (2) = 17.83/13.84 = 139.24%

Epreuve ou L= 700mm - H= 57mm 0.8714:



valeurs filtrées du graphique.

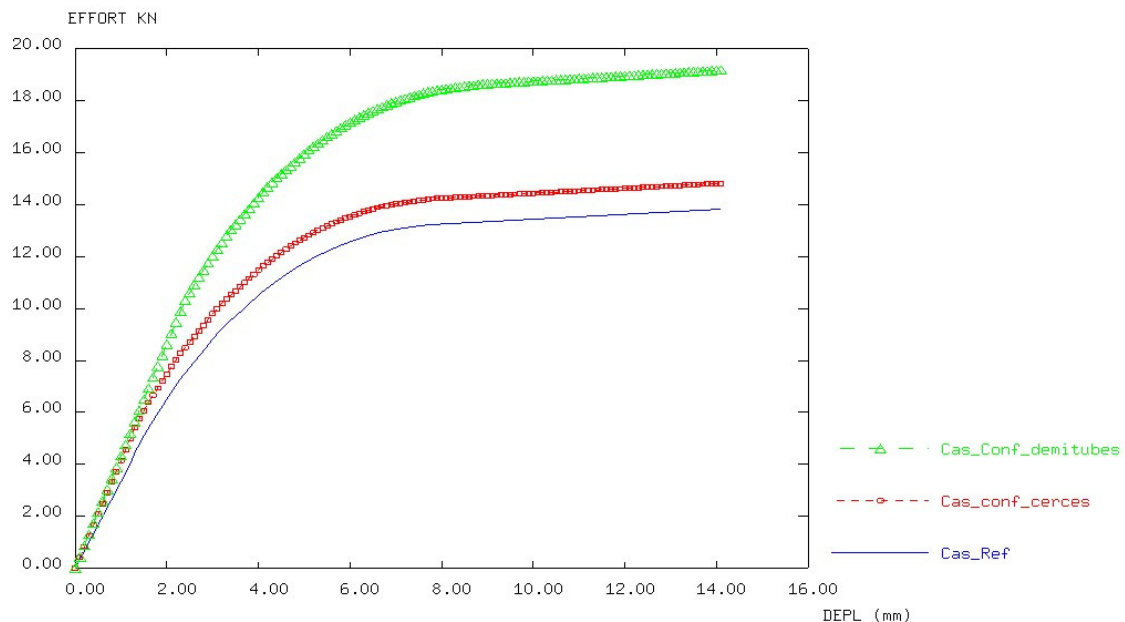
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.33E-01	3.33E+00	6.41E+00	1.02E+01	1.38E+01	1.47E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.71E-01	3.48E+00	6.98E+00	1.26E+01	1.77E+01	1.92E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.81/12.80 = 107.85%

cas (4)/cas (2) = 17.69/13.81 = 138.18%

Epreuve ou L= 720mm - H= 57mm 0.846:



valeurs filtrées du graphique.

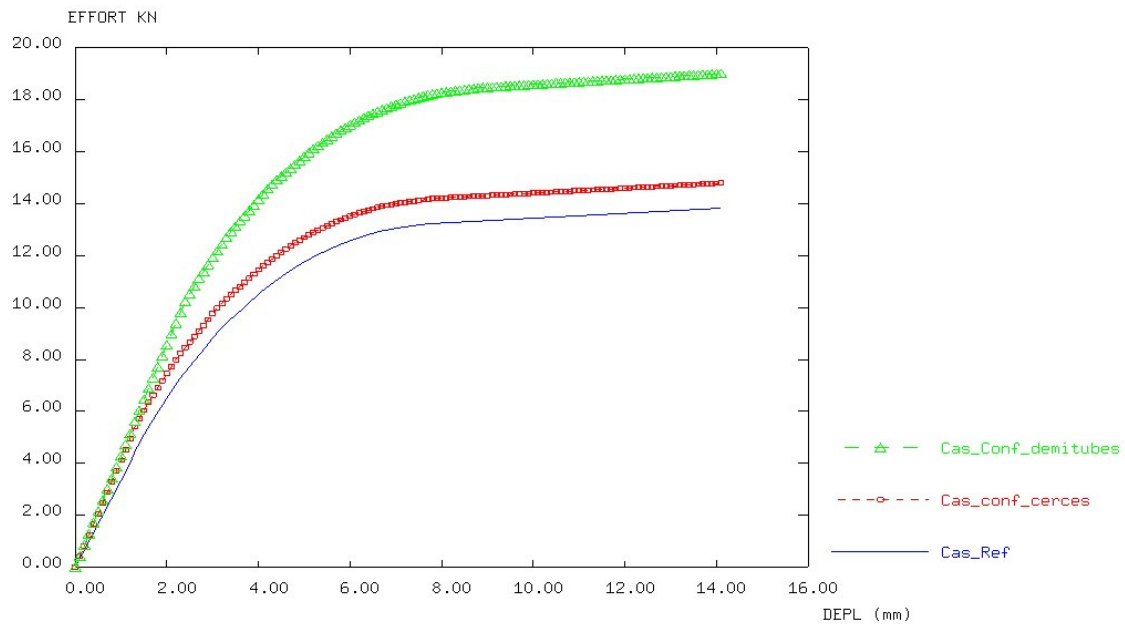
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.28E-01	3.31E+00	6.38E+00	1.02E+01	1.38E+01	1.47E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.65E-01	3.46E+00	6.93E+00	1.25E+01	1.75E+01	1.91E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.78/12.80 = 107.62%

cas (4)/cas (2) = 17.55/13.78 = 137.07%

Epreuve où L= 740mm - H= 57mm 0.8196:



valeurs filtrées du graphique.

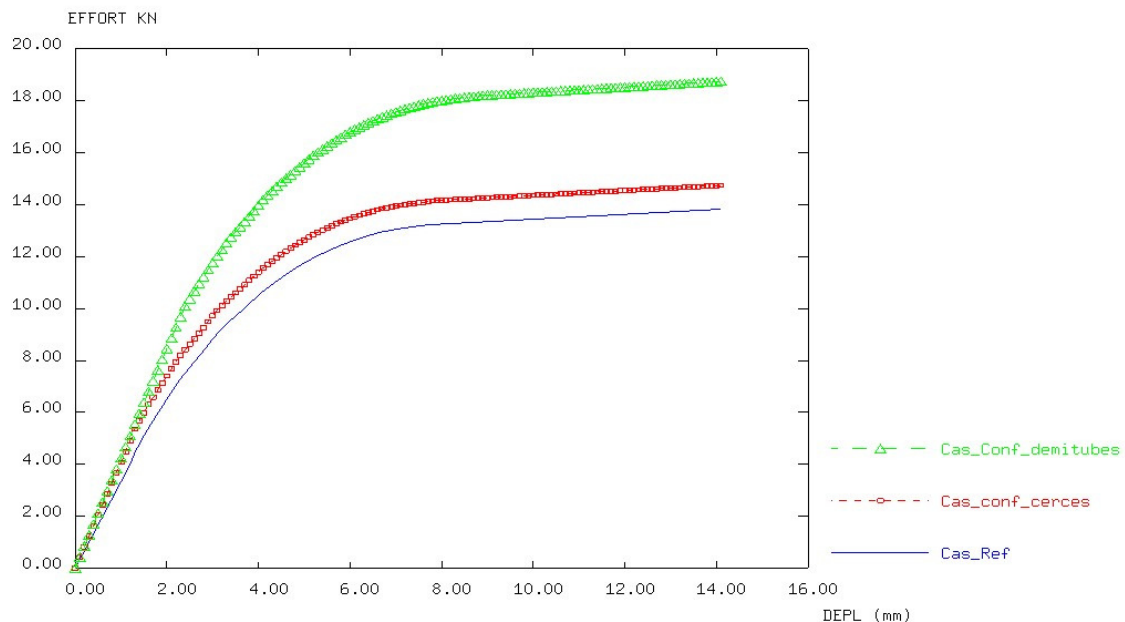
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN]poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN]avec cerces	0.00E+00	8.23E-01	3.29E+00	6.35E+00	1.02E+01	1.37E+01	1.47E+01
4	Effort [KN]avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.59E-01	3.44E+00	6.88E+00	1.24E+01	1.74E+01	1.89E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.75/12.80 = 107.38%

cas (4)/cas (2) = 17.40/13.75 = 135.91%

Epreuve où L= 760mm - H= 57mm 0.777:



valeurs filtrées du graphique.

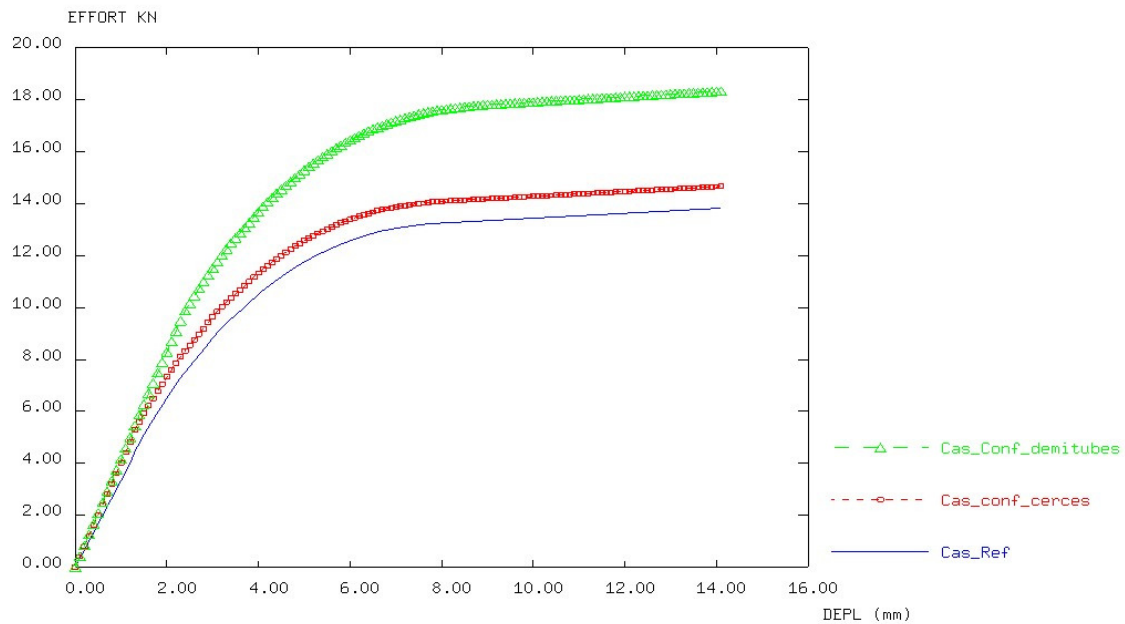
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN]poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN]avec cerces	0.00E+00	8.15E-01	3.26E+00	6.30E+00	1.01E+01	1.37E+01	1.46E+01
4	Effort [KN]avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.49E-01	3.39E+00	6.81E+00	1.23E+01	1.72E+01	1.86E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.70/12.80 = 107.00%

cas (4)/cas (2) = 17.16/13.70 = 134.05%

Epreuve où L= 780mm - H= 57mm 0.7123:



valeurs filtrées du graphique.

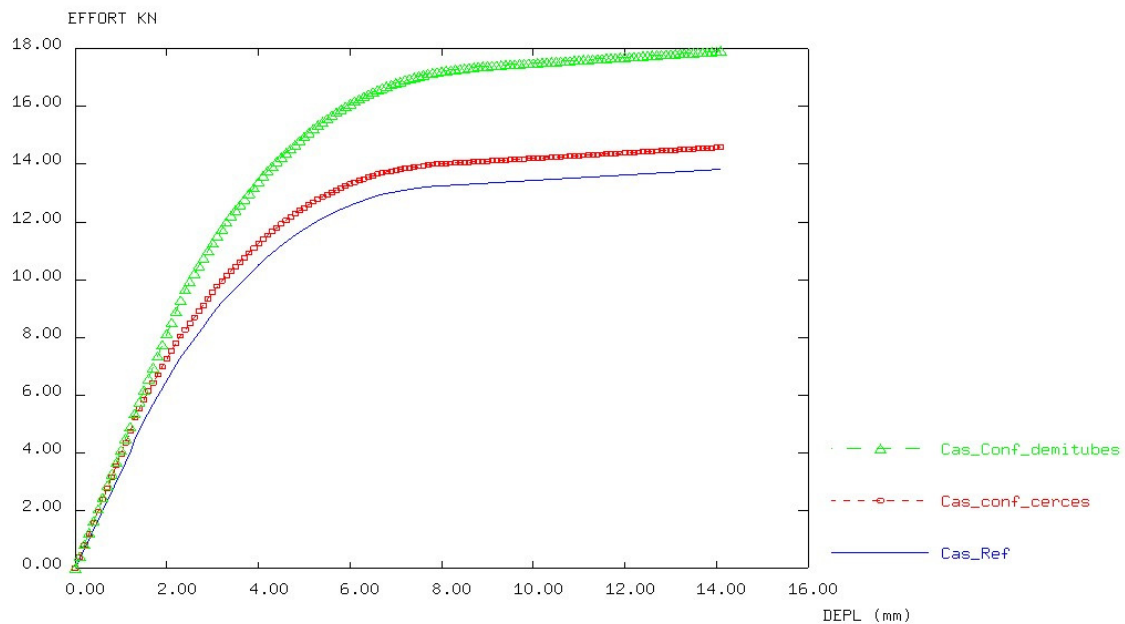
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.03E-01	3.21E+00	6.22E+00	1.00E+01	1.36E+01	1.45E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.33E-01	3.33E+00	6.69E+00	1.20E+01	1.68E+01	1.82E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.62/12.80 = 106.41%

cas (4)/cas (2) = 16.80/13.62 = 131.21%

Epreuve où L= 800mm - H= 57mm 0.6475:



valeurs filtrées du graphique.

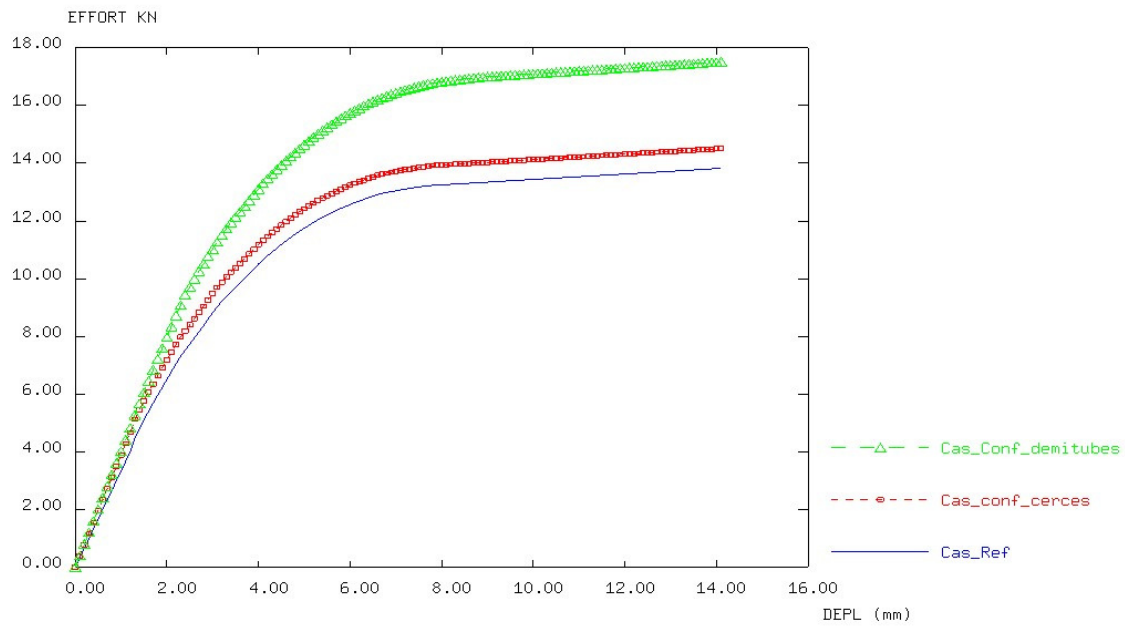
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	7.90E-01	3.16E+00	6.15E+00	9.96E+00	1.35E+01	1.45E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.18E-01	3.27E+00	6.57E+00	1.18E+01	1.64E+01	1.78E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.55/12.80 = 105.83%

cas (4)/cas (2) = 16.44/13.55 = 128.37%

Epreuve où L= 820mm - H= 57mm 0.5828:



valeurs filtrées du graphique.

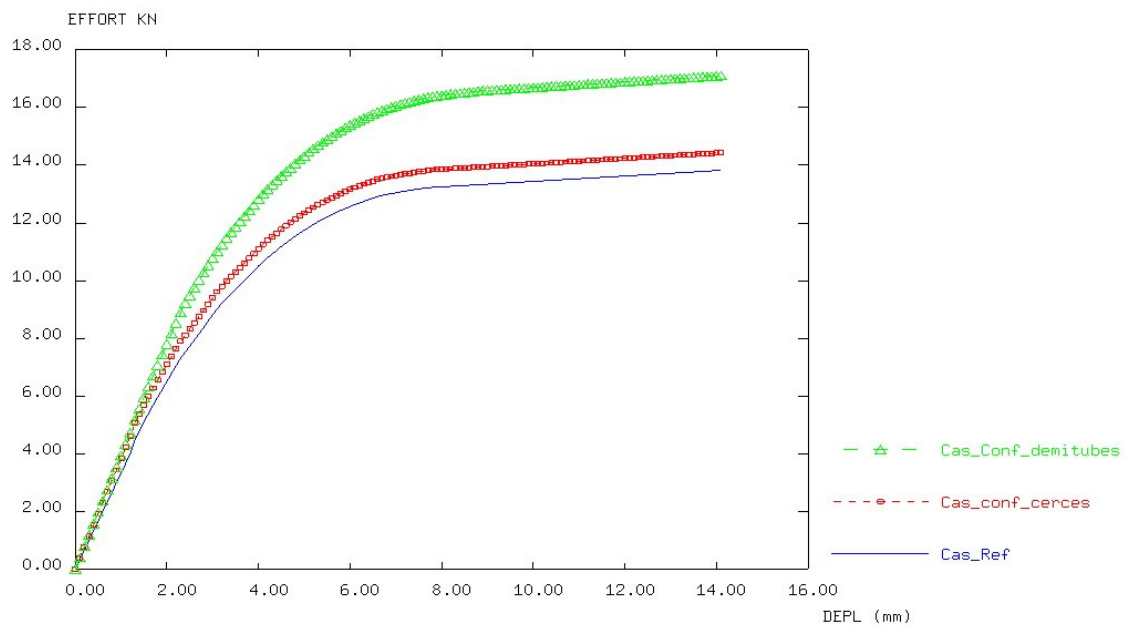
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	7.78E-01	3.11E+00	6.07E+00	9.88E+00	1.35E+01	1.44E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.03E-01	3.21E+00	6.46E+00	1.15E+01	1.61E+01	1.74E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.48/12.80 = 105.25%

cas (4)/cas (2) = 16.07/13.48 = 125.54%

Epreuve où L= 840mm - H= 57mm 0.518:



valeurs filtrées du graphique.

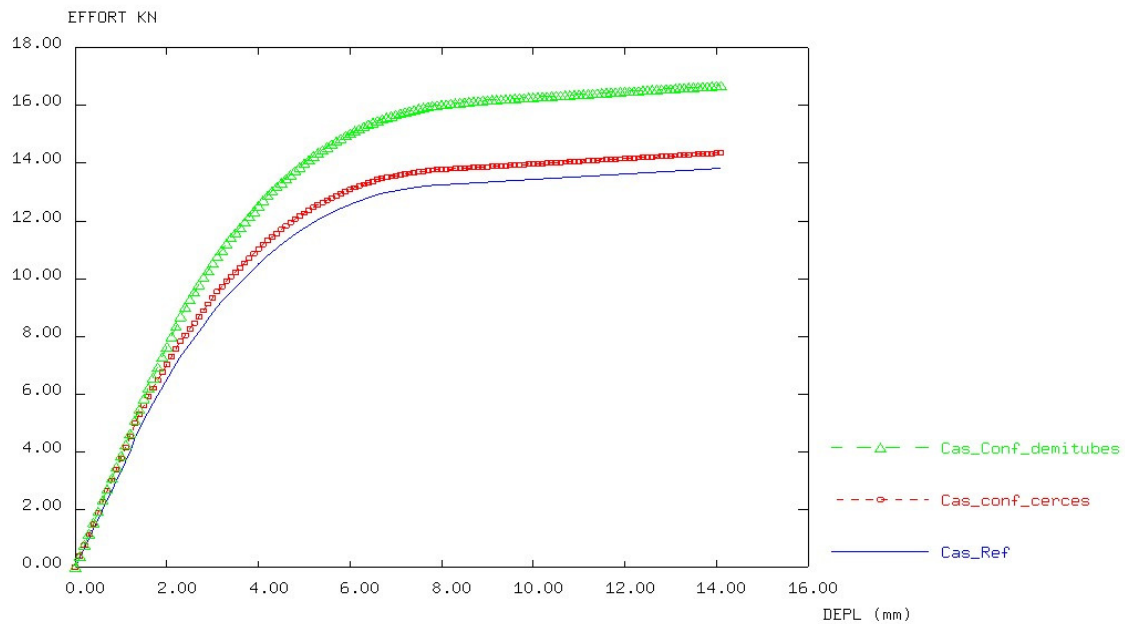
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	7.65E-01	3.06E+00	6.00E+00	9.81E+00	1.34E+01	1.43E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	7.88E-01	3.15E+00	6.34E+00	1.12E+01	1.57E+01	1.70E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.40/12.80 = 104.67%

cas (4)/cas (2) = 15.71/13.40 = 122.70%

Epreuve où L= 860mm - H= 57mm 0.4533:



valeurs filtrées du graphique.

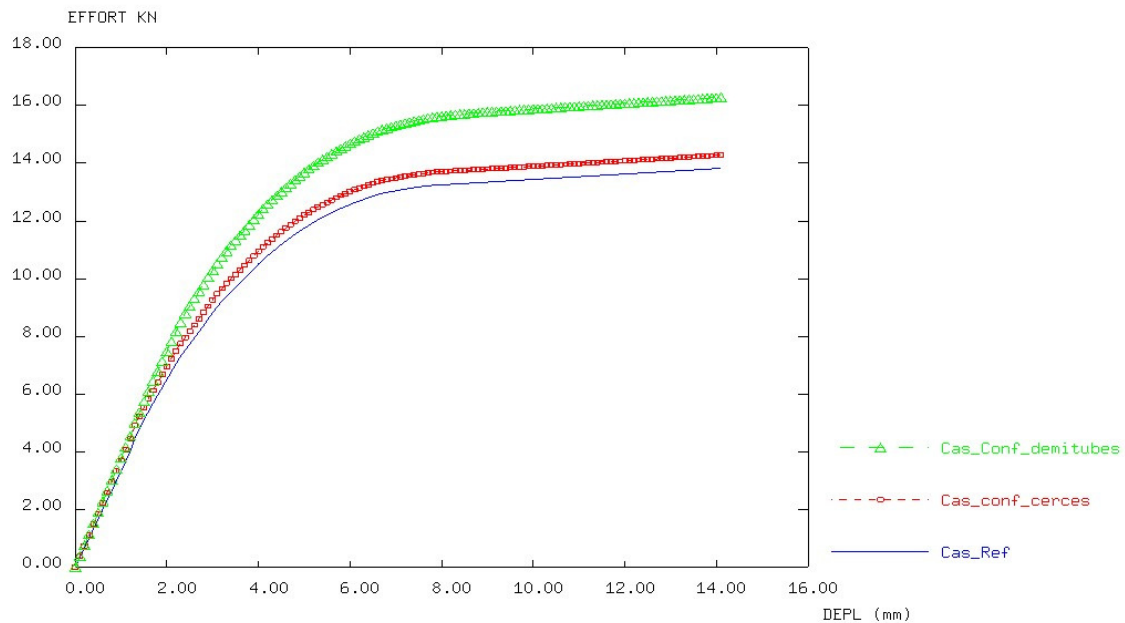
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28
2	Effort[KN]poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37
3	Effort[KN]avec cerces	0.00E+00	7.53E-01	3.01E+00	5.92E+00	9.73E+00	1.33E+01	1.42
4	Effort[KN]avec cerces et demi tubes	0.00E+00	7.73E-01	3.09E+00	6.22E+00	1.10E+01	1.53E+01	1.66

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.33/12.80 = 104.08%

cas (4)/cas (2) = 15.35/13.33 = 119.86%

Epreuve où L= 880mm - H= 57mm 0.3885:



valeurs filtrées du graphique.

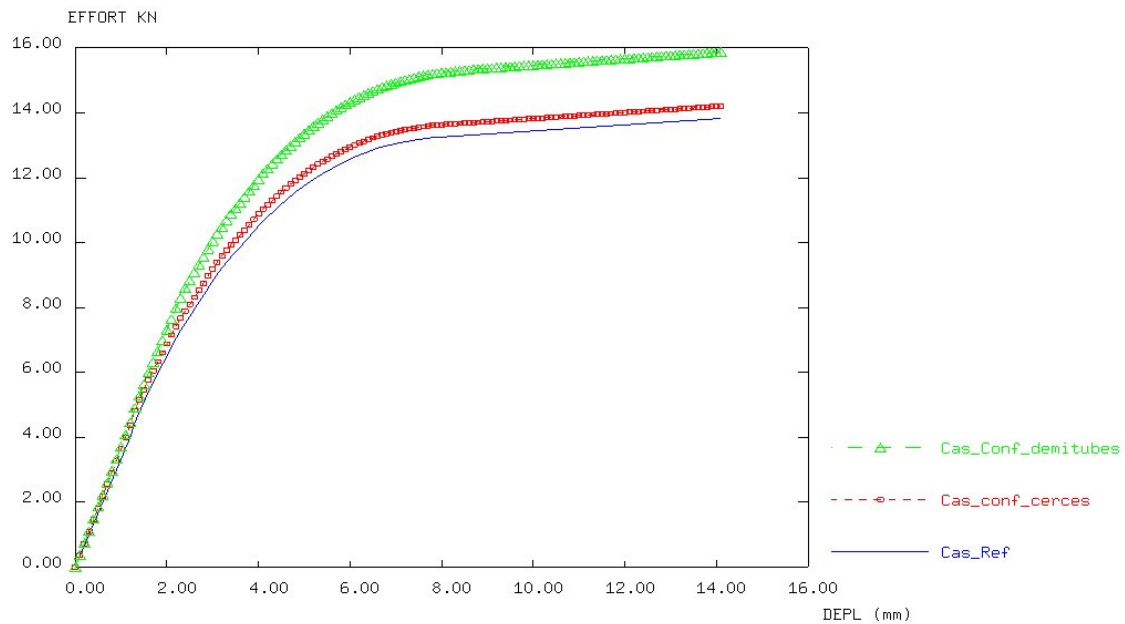
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28
2	Effort[KN]poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37
3	Effort[KN]avec cerces	0.00E+00	7.41E-01	2.96E+00	5.85E+00	9.66E+00	1.33E+01	1.42
4	Effort[KN]avec cerces et demi tubes	0.00E+00	7.57E-01	3.03E+00	6.10E+00	1.07E+01	1.50E+01	1.62

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.25/12.80 = 103.50%

cas (4)/cas (2) = 14.98/13.25 = 117.02%

Epreuve où L= 900mm - H= 57mm 0.3238:



valeurs filtrées du graphique.

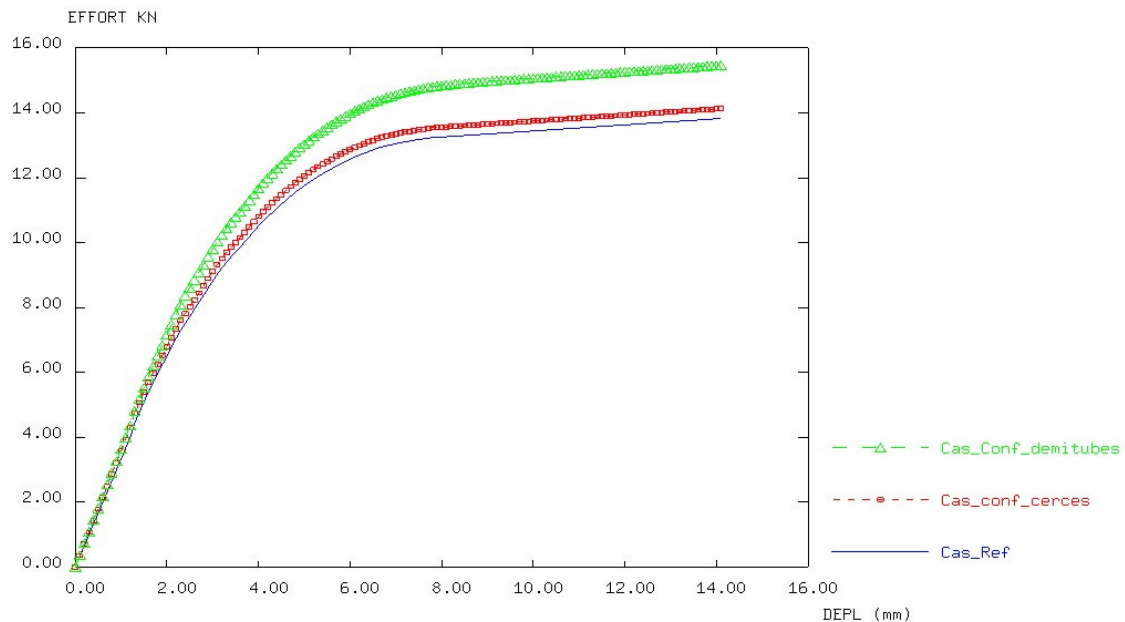
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.2
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.3
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	7.28E-01	2.91E+00	5.78E+00	9.58E+00	1.32E+01	1.4
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	7.42E-01	2.97E+00	5.99E+00	1.05E+01	1.46E+01	1.5

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.18/12.80 = 102.92%

cas (4)/cas (2) = 14.62/13.18 = 114.19%

Epreuve où L= 920mm - H= 57mm 0.259:



valeurs filtrées du graphique.

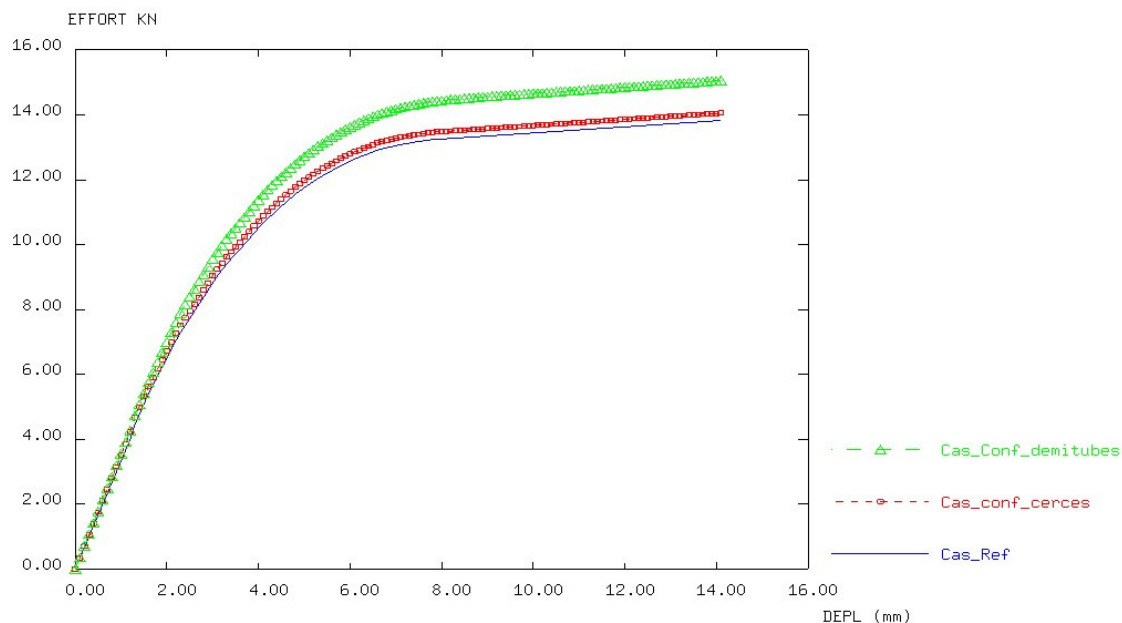
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	7.16E-01	2.86E+00	5.70E+00	9.51E+00	1.31E+01	1.40E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	7.27E-01	2.91E+00	5.87E+00	1.02E+01	1.43E+01	1.53E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.10/12.80 = 102.33%

cas (4)/cas (2) = 14.26/13.10 = 111.35%

Epreuve où L= 940mm - H= 57mm 0.1943:



valeurs filtrées du graphique.

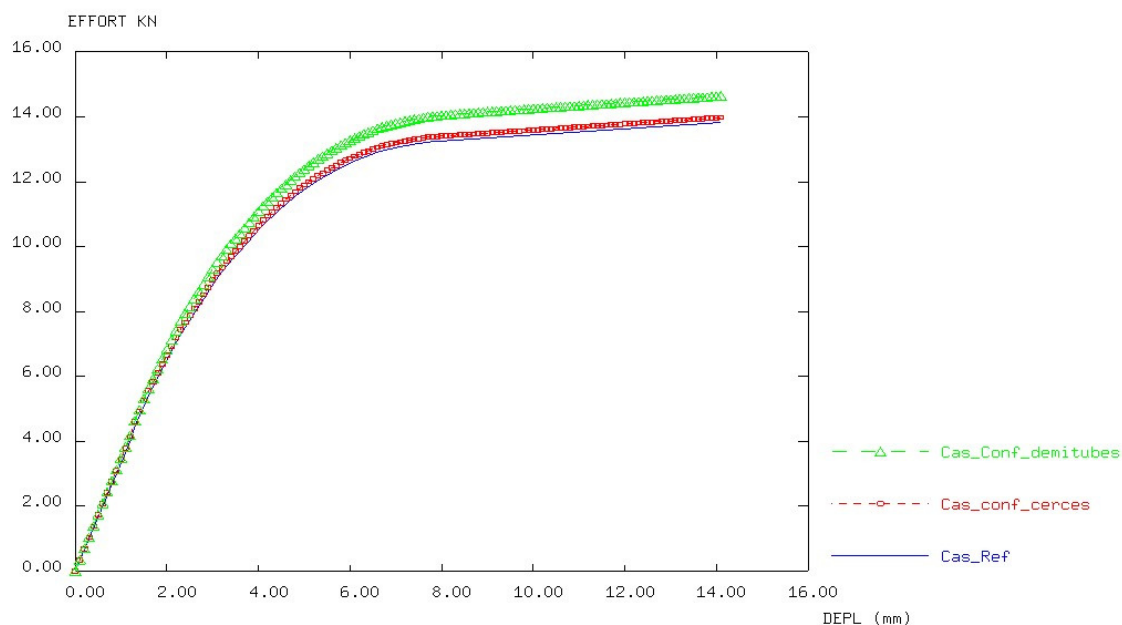
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN]poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN]avec cerces	0.00E+00	7.03E-01	2.81E+00	5.63E+00	9.43E+00	1.30E+01	1.39E+01
4 Effort [KN]avec cerces et demi tubes	0.00E+00	7.12E-01	2.85E+00	5.75E+00	9.97E+00	1.39E+01	1.49E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.03/12.80 = 101.75%

cas (4)/cas (2) = 13.89/13.03 = 108.51%

Epreuve où L= 960mm - H= 57mm 0.1295:



valeurs filtrées du graphique.

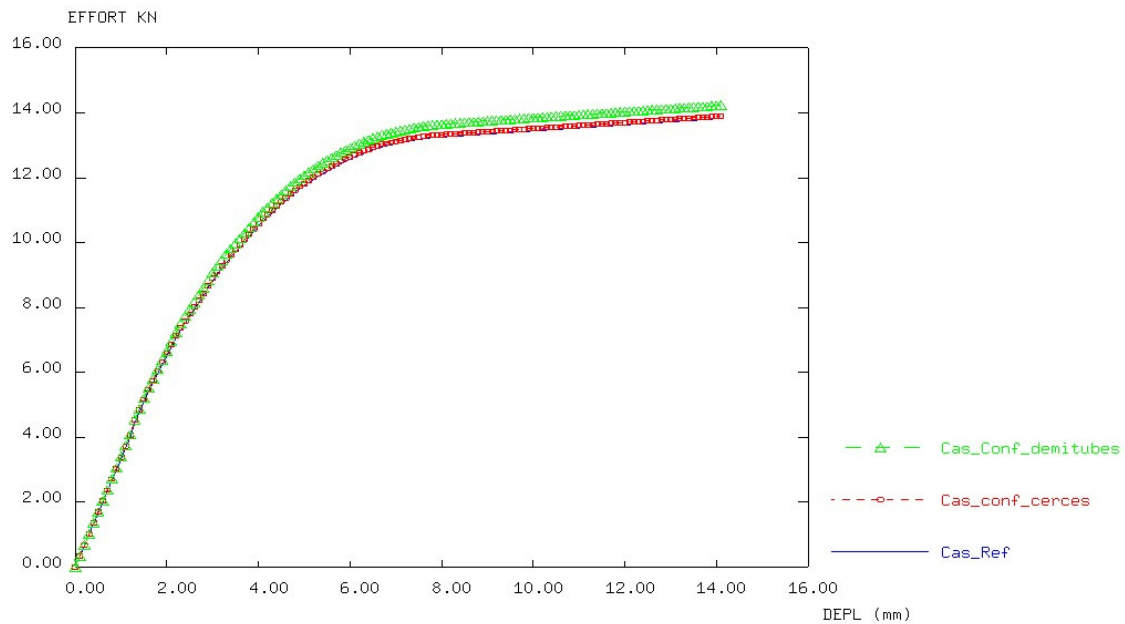
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN]poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN]avec cerces	0.00E+00	6.91E-01	2.76E+00	5.55E+00	9.36E+00	1.30E+01	1.39E+01
4 Effort [KN]avec cerces et demi tubes	0.00E+00	6.96E-01	2.78E+00	5.64E+00	9.72E+00	1.35E+01	1.45E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 12.95/12.80 = 101.17%

cas (4)/cas (2) = 13.53/12.95 = 105.67%

Epreuve où L= 980mm - H= 57mm 0.0648:



valeurs filtrées du graphique.

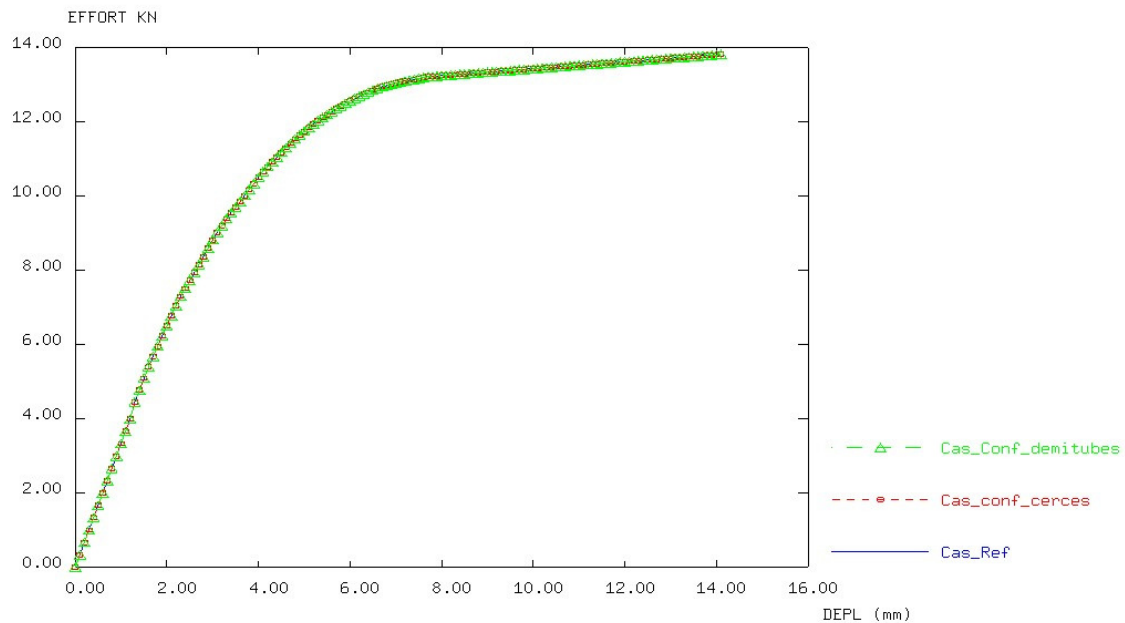
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	6.78E-01	2.71E+00	5.48E+00	9.28E+00	1.29E+01	1
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	6.81E-01	2.72E+00	5.52E+00	9.46E+00	1.32E+01	1

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 12.88/12.80 = 100.58%

cas (4)/cas (2) = 13.17/12.88 = 102.84%

Epreuve où L= 1000mm - H= 57mm 0:



valeurs filtrées du graphique.

1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01

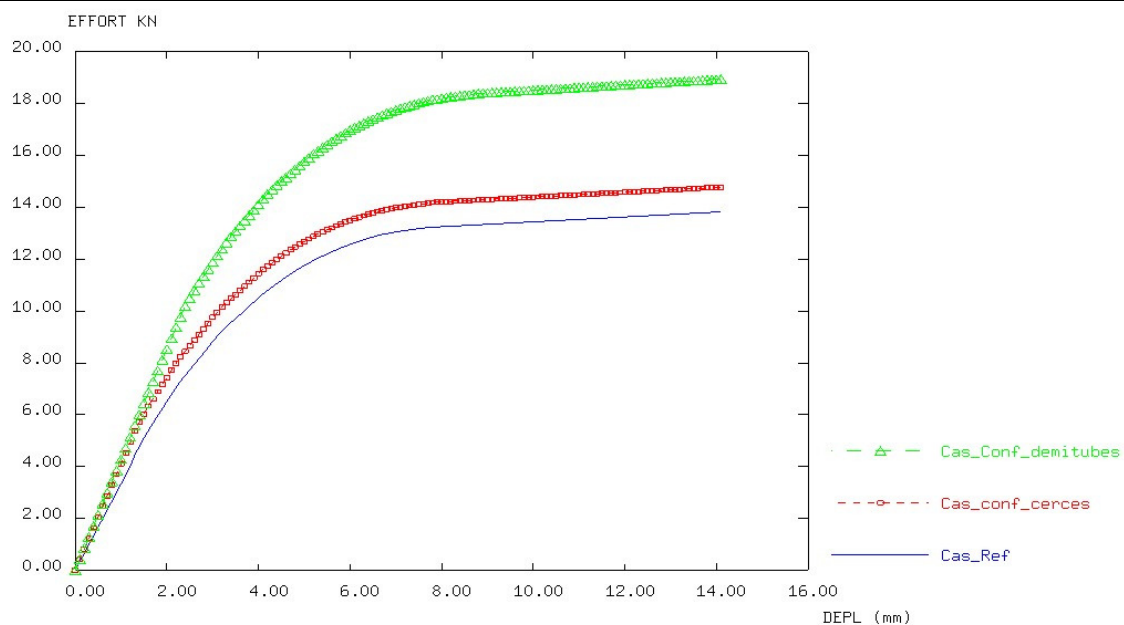
rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 12.80/12.80 = 100.00%

cas (4)/cas (2) = 12.80/12.80 = 100.00%

Annexe3 : APPLICATION SUR L'INFLUENCE DE VARIATION DE LA LARGEUR DU CERCE :

Epreuve où L= 550mm - H= 10mm 0.5549



valeurs filtrées du graphique.

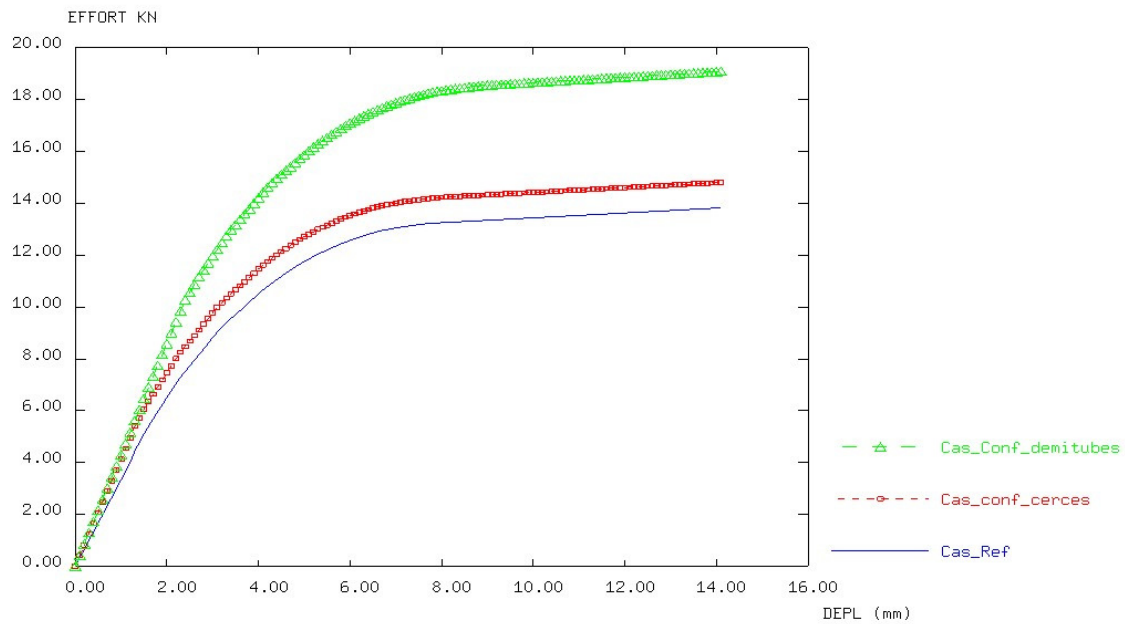
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	7.73E-01	3.09E+00	6.04E+00	9.85E+00	1.34E+01	1.44E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	7.96E-01	3.19E+00	6.41E+00	1.14E+01	1.59E+01	1.72E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.44/12.80 = 105.00%

cas (4)/cas (2) = 15.92/13.44 = 124.31%

Epreuve où L= 550mm - H= 12mm 0.619



valeurs filtrées du graphique.

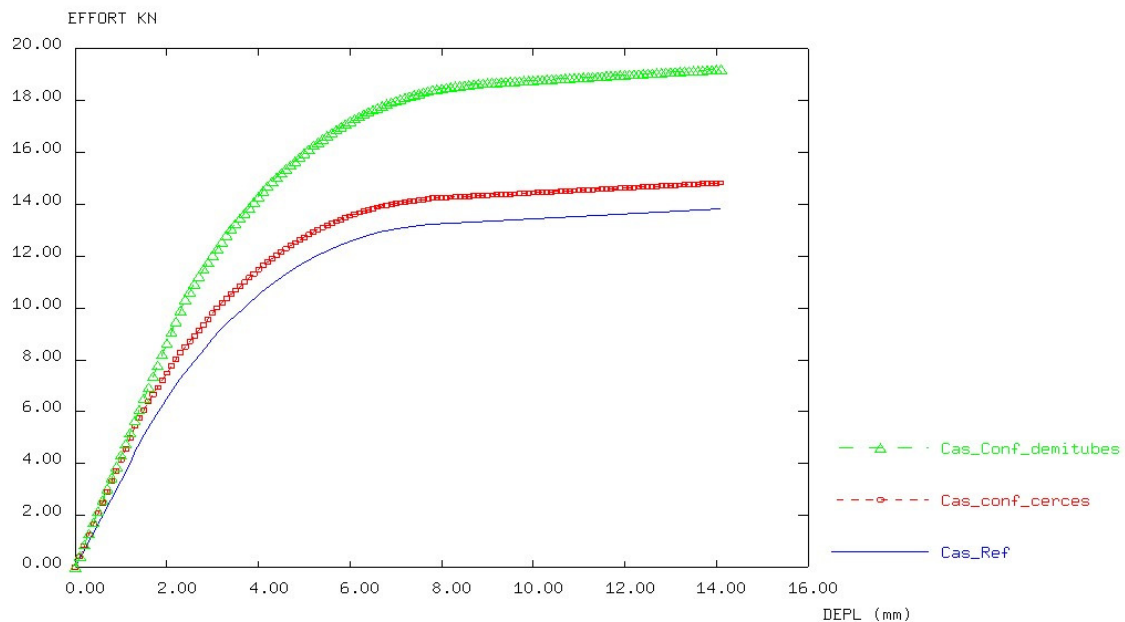
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort[KN]poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort[KN]avec cerces	0.00E+00	7.85E-01	3.14E+00	6.12E+00	9.92E+00	1.35E+01	1.44E+01
4	Effort[KN]avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.11E-01	3.25E+00	6.52E+00	1.16E+01	1.63E+01	1.76E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.52/12.80 = 105.57%

cas (4)/cas (2) = 16.28/13.52 = 127.12%

Epreuve où L= 550mm - H= 14mm 0.6716



valeurs filtrées du graphique.

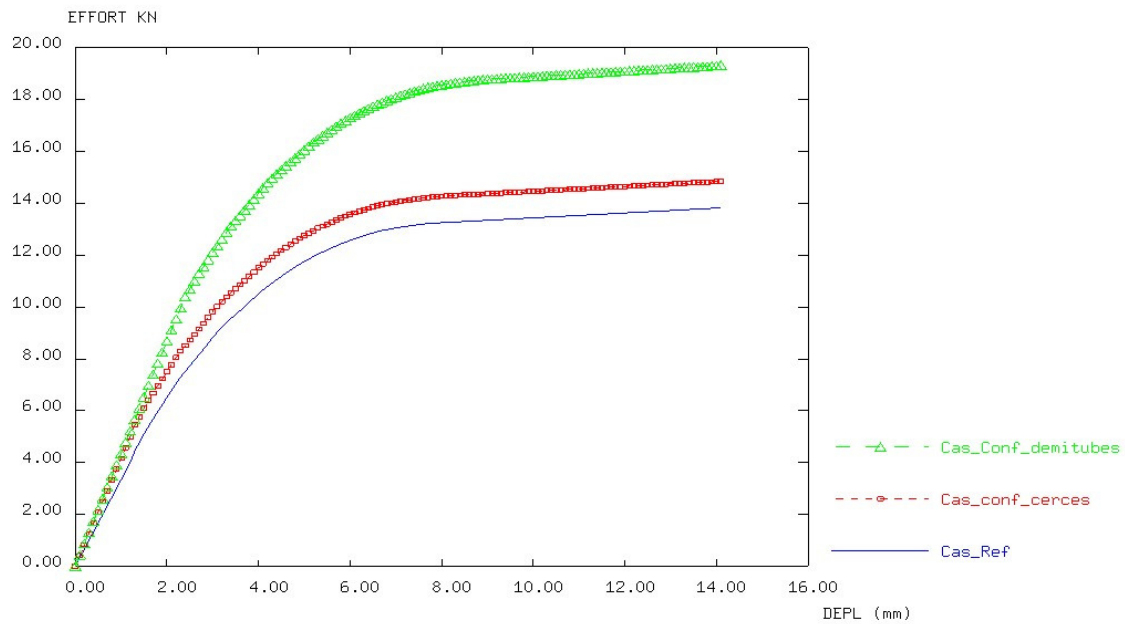
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort[KN]poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort[KN]avec cerces	0.00E+00	7.95E-01	3.18E+00	6.18E+00	9.98E+00	1.36E+01	1.45E+01
4	Effort[KN]avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.24E-01	3.30E+00	6.62E+00	1.19E+01	1.66E+01	1.80E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.58/12.80 = 106.05%

cas (4)/cas (2) = 16.57/13.58 = 129.43%

Epreuve où L= 550mm - H= 16mm 0.7152



valeurs filtrées du graphique.

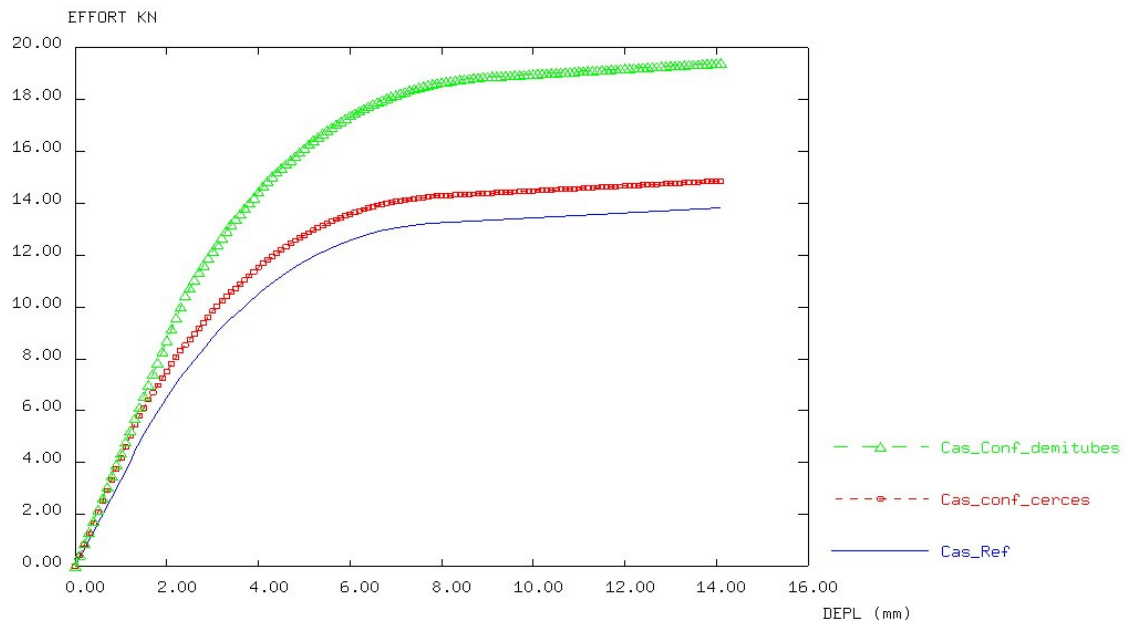
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.03E-01	3.21E+00	6.23E+00	1.00E+01	1.36E+01	1.45E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.34E-01	3.34E+00	6.70E+00	1.20E+01	1.68E+01	1.82E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.63/12.80 = 106.44%

cas (4)/cas (2) = 16.82/13.63 = 131.34%

Epreuve où L= 550mm - H= 18mm 0.7516



valeurs filtrées du graphique.

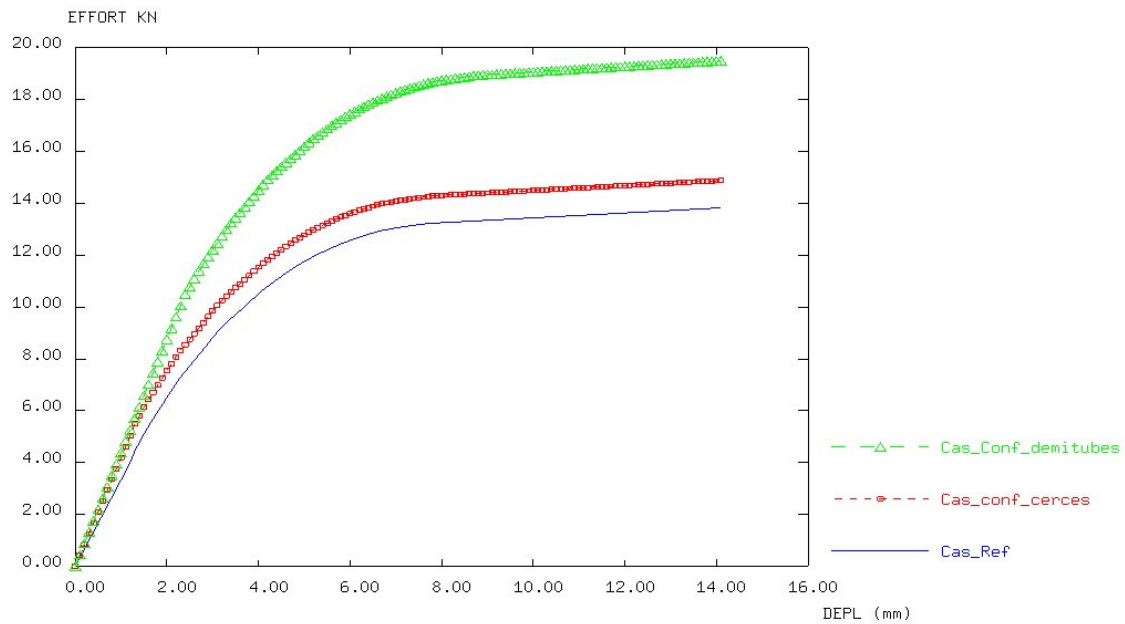
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.10E-01	3.24E+00	6.27E+00	1.01E+01	1.37E+01	1.46E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.43E-01	3.37E+00	6.76E+00	1.22E+01	1.70E+01	1.85E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.67/12.80 = 106.77%

cas (4)/cas (2) = 17.02/13.67 = 132.93%

Epreuve où L= 550mm - H= 20mm 0.7823



valeurs filtrées du graphique.

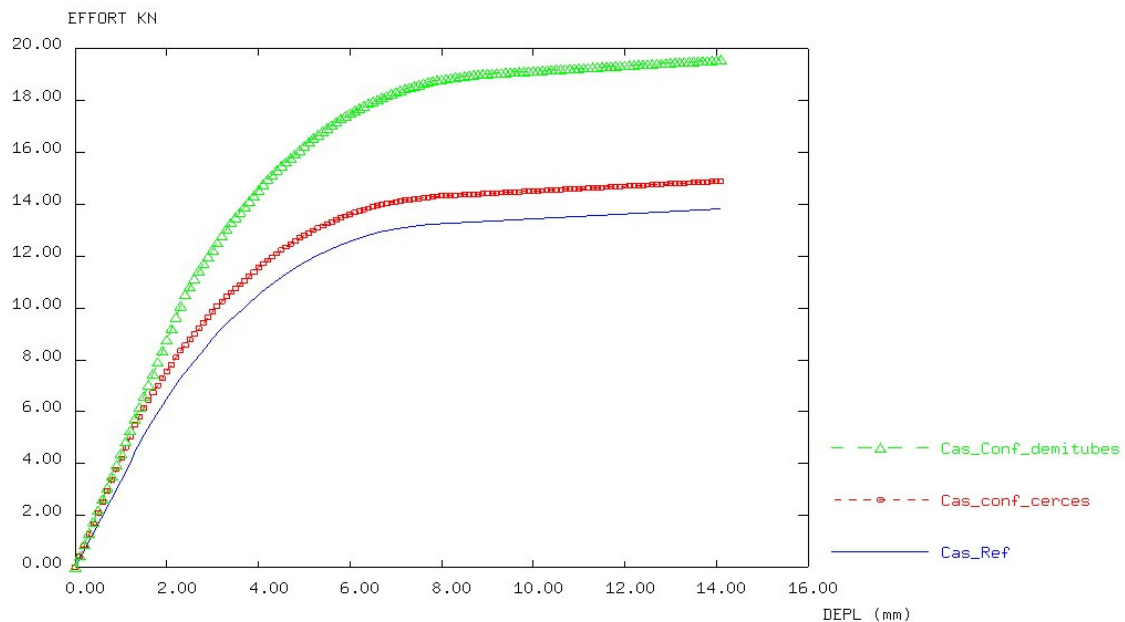
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.16E-01	3.26E+00	6.30E+00	1.01E+01	1.37E+01	1.46E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.50E-01	3.40E+00	6.82E+00	1.23E+01	1.72E+01	1.87E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.71/12.80 = 107.05%

cas (4)/cas (2) = 17.19/13.71 = 134.28%

Epreuve où L= 550mm - H= 22mm 0.8084



valeurs filtrées du graphique.

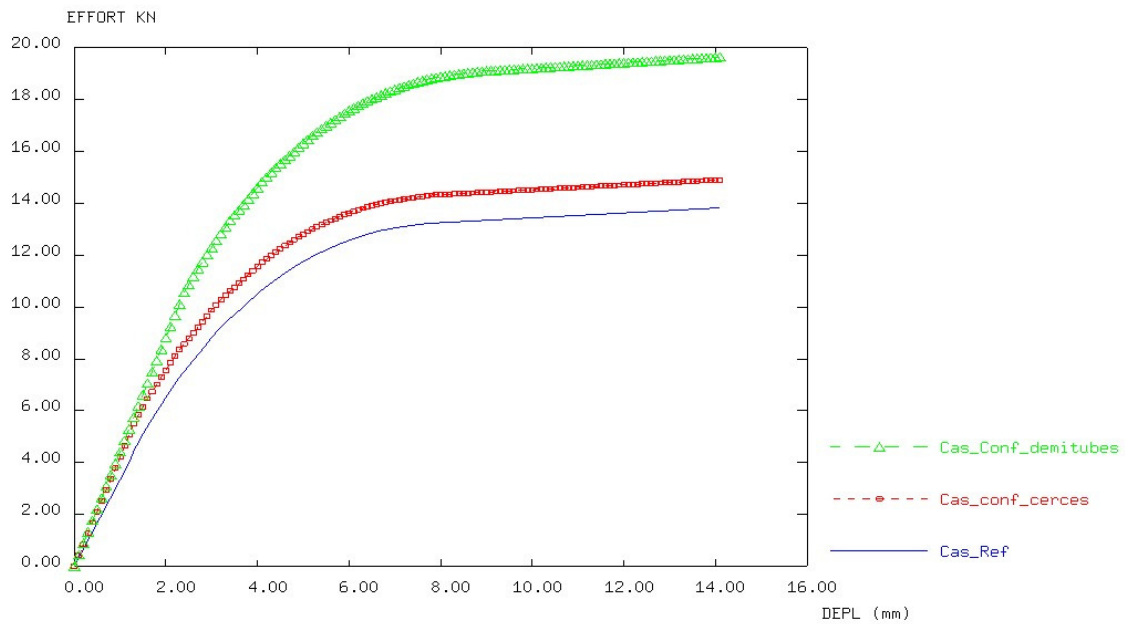
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.21E-01	3.28E+00	6.33E+00	1.01E+01	1.37E+01	1.47E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.56E-01	3.42E+00	6.86E+00	1.24E+01	1.73E+01	1.88E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.74/12.80 = 107.28%

cas (4)/cas (2) = 17.34/13.74 = 135.42%

Epreuve où L= 550mm - H= 24mm 0.8309



valeurs filtrées du graphique.

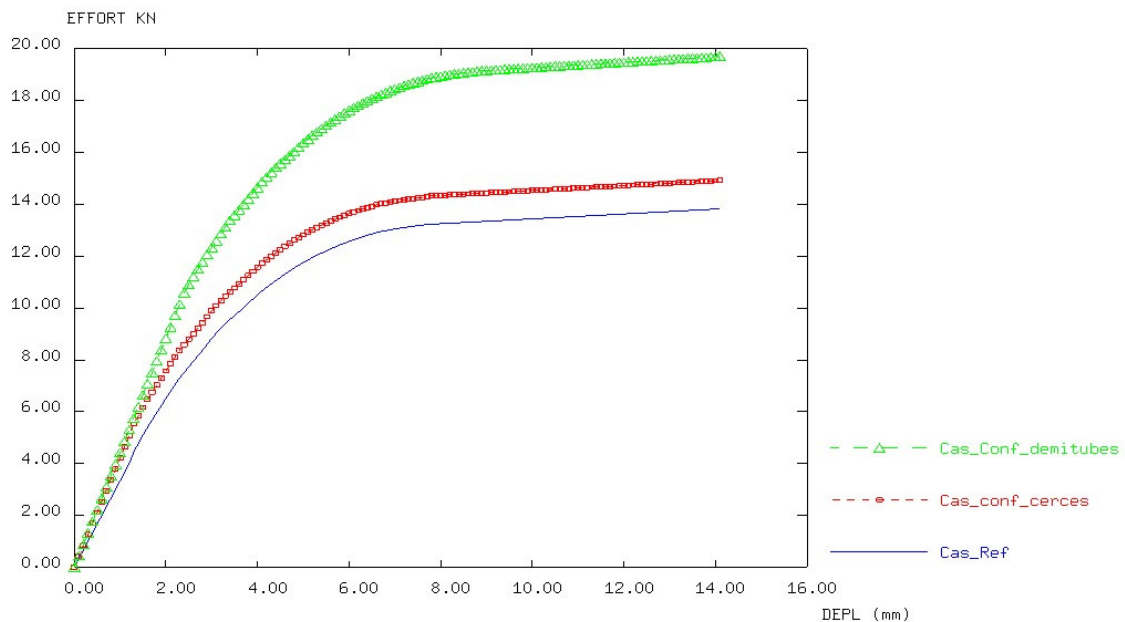
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.26E-01	3.30E+00	6.36E+00	1.02E+01	1.38E+01	1.47E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.61E-01	3.45E+00	6.90E+00	1.25E+01	1.75E+01	1.90E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.76/12.80 = 107.48%

cas (4)/cas (2) = 17.46/13.76 = 136.41%

Epreuve où L= 550mm - H= 26mm 0.8505



valeurs filtrées du graphique.

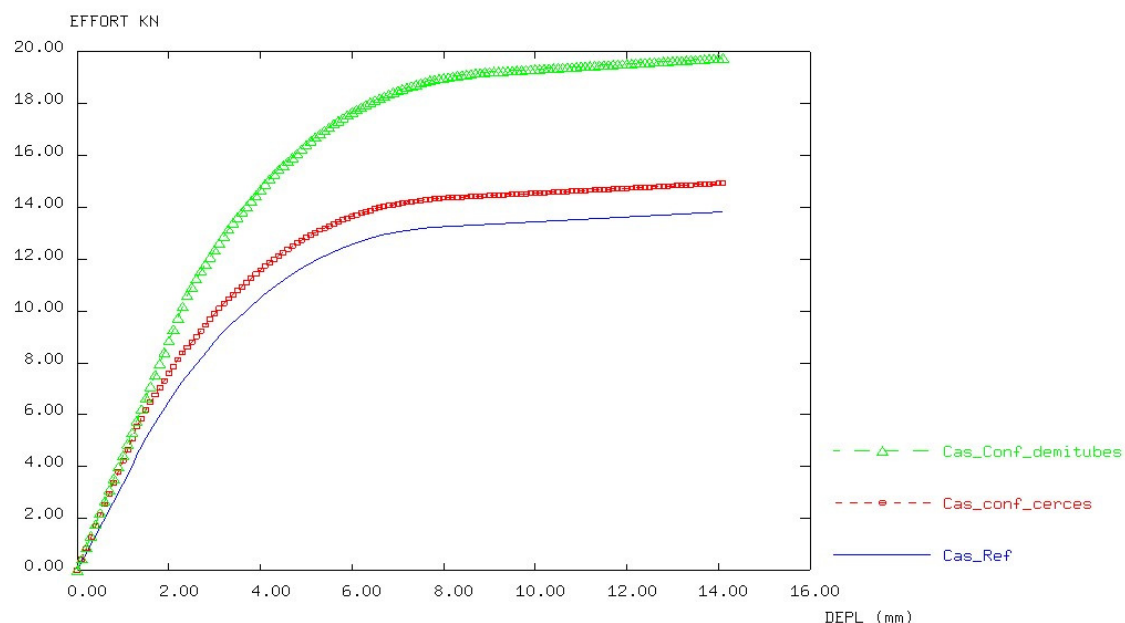
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.29E-01	3.32E+00	6.38E+00	1.02E+01	1.38E+01	1.47E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.66E-01	3.46E+00	6.94E+00	1.26E+01	1.76E+01	1.91E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.78/12.80 = 107.66%

cas (4)/cas (2) = 17.57/13.78 = 137.27%

Epreuve où L= 550mm - H= 28mm 0.8675



valeurs filtrées du graphique.

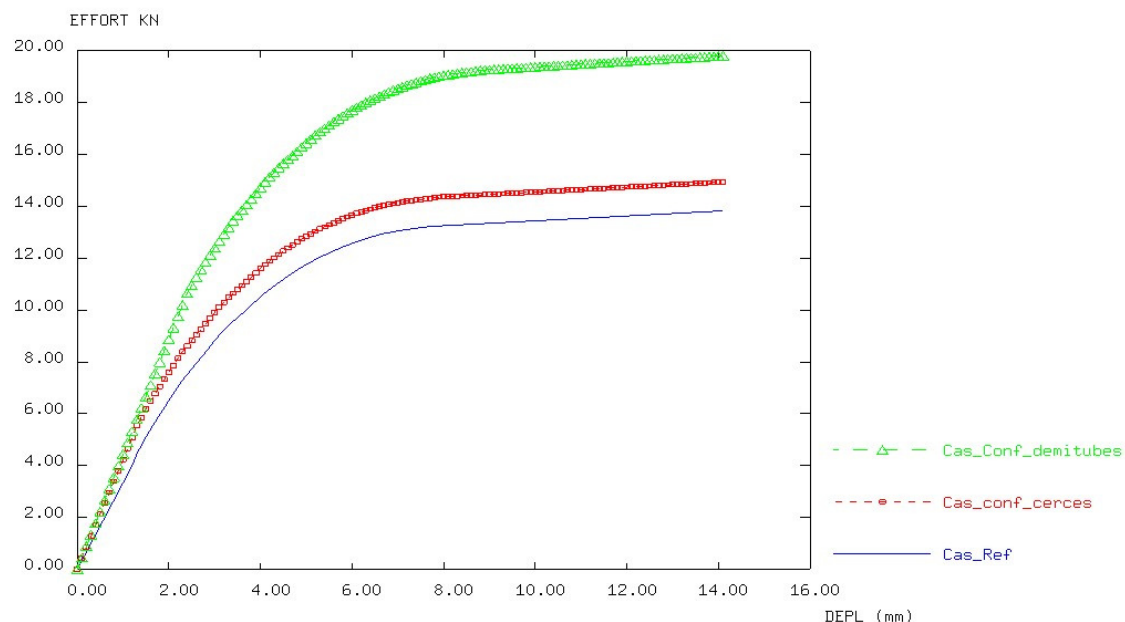
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.33E-01	3.33E+00	6.40E+00	1.02E+01	1.38E+01	1.47E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.70E-01	3.48E+00	6.97E+00	1.26E+01	1.77E+01	1.92E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.80/12.80 = 107.81%

cas (4)/cas (2) = 17.67/13.80 = 138.01%

Epreuve où L= 550mm - H= 30mm 0.8826



valeurs filtrées du graphique.

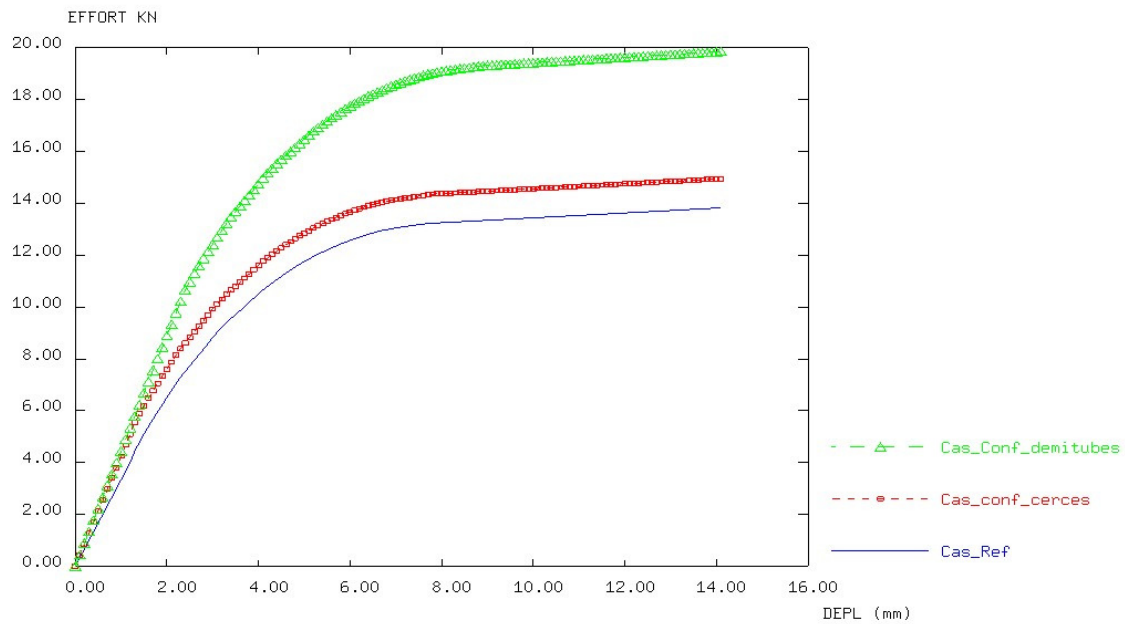
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.35E-01	3.34E+00	6.42E+00	1.02E+01	1.38E+01	1.47E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.73E-01	3.49E+00	7.00E+00	1.27E+01	1.78E+01	1.93E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.82/12.80 = 107.95%

cas (4)/cas (2) = 17.75/13.82 = 138.67%

Epreuve où L= 550mm - H= 32mm 0.8959

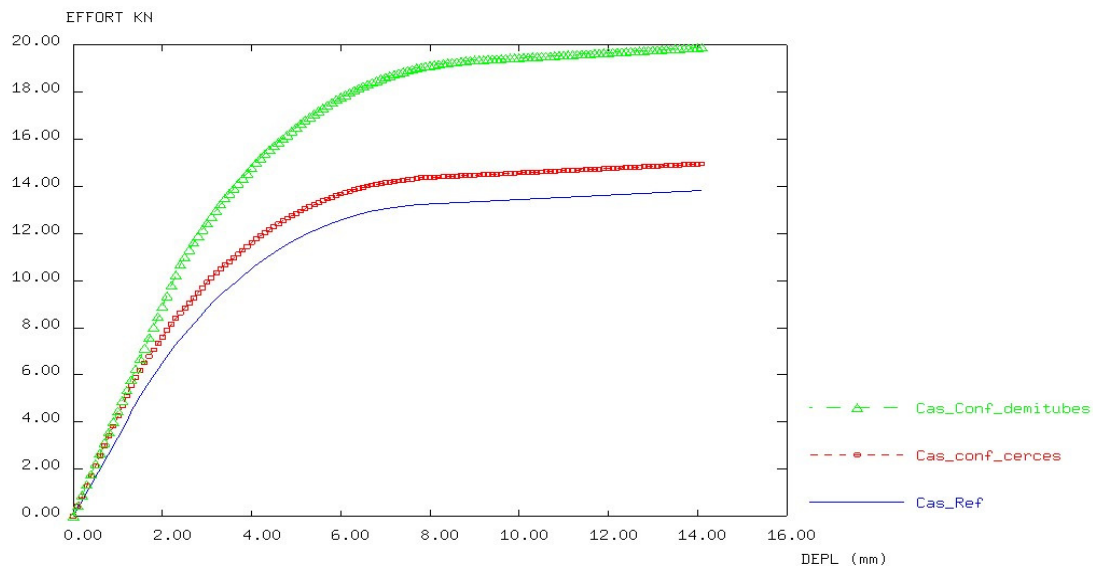


valeurs filtrées du graphique.

1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.38E-01	3.35E+00	6.43E+00	1.02E+01	1.38E+01	1.48E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.77E-01	3.51E+00	7.02E+00	1.27E+01	1.78E+01	1.94E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence
cas (3)/cas (2) = 13.84/12.80 = 108.07%
cas (4)/cas (2) = 17.83/13.84 = 139.26%

Epreuve où L= 550mm - H= 34mm 0.9078

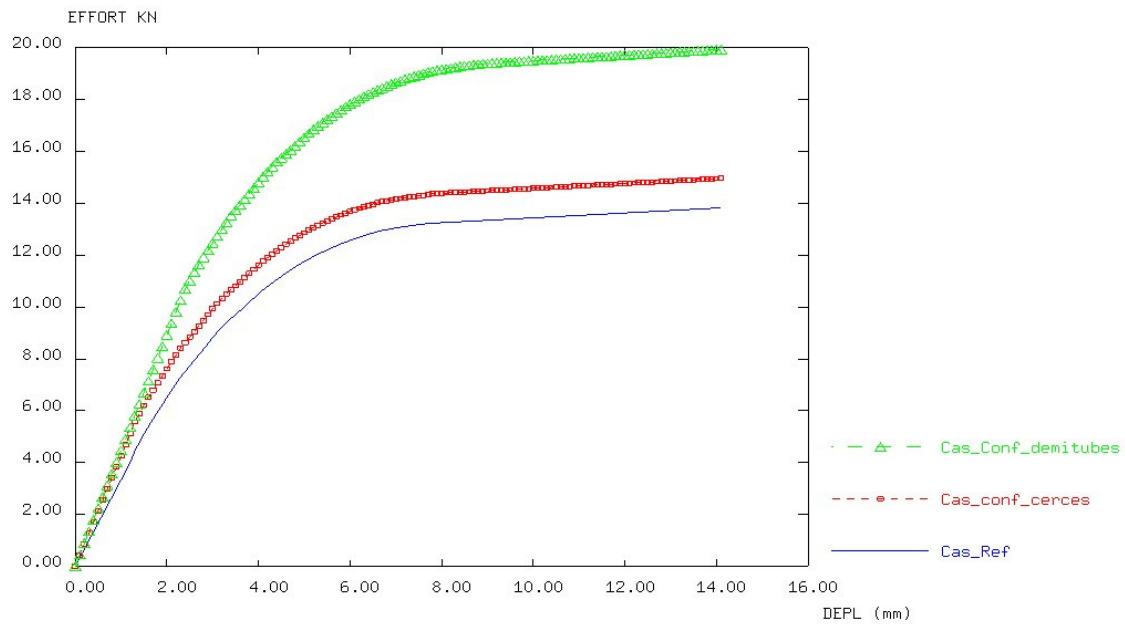


valeurs filtrées du graphique.

1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.40E-01	3.36E+00	6.45E+00	1.03E+01	1.38E+01	1.48E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.79E-01	3.52E+00	7.04E+00	1.28E+01	1.79E+01	1.94E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence
cas (3)/cas (2) = 13.85/12.80 = 108.18%
cas (4)/cas (2) = 17.90/13.85 = 139.78%

Epreuve où L= 550mm - H= 36mm 0.9184



valeurs filtrées du graphique.

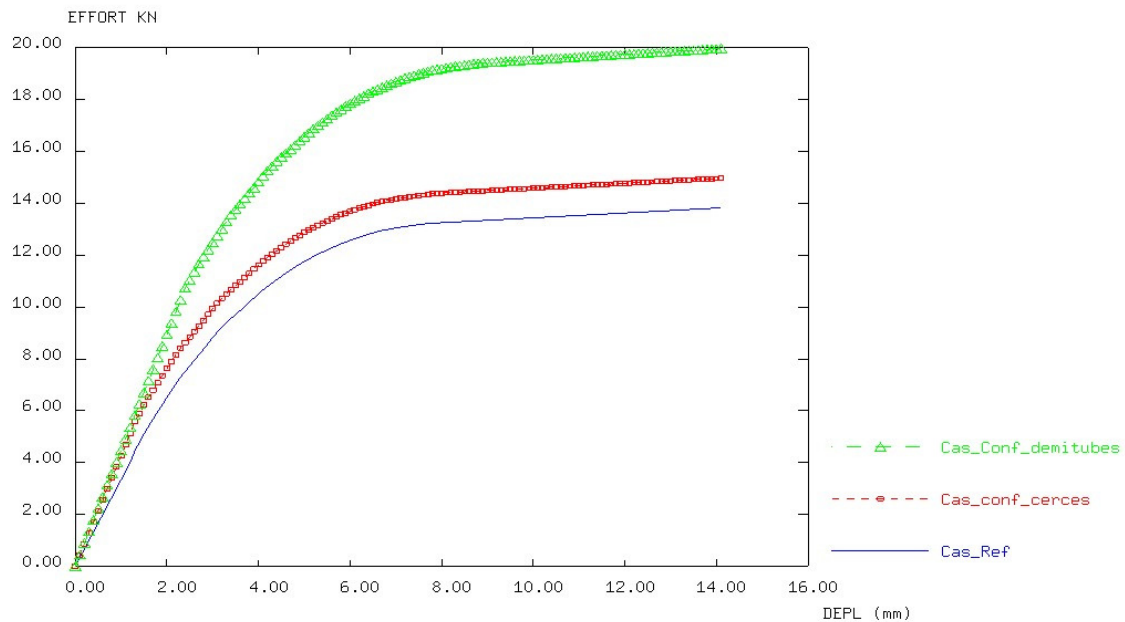
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.42E-01	3.37E+00	6.46E+00	1.03E+01	1.39E+01	1.48E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.82E-01	3.53E+00	7.06E+00	1.28E+01	1.80E+01	1.95E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.86/12.80 = 108.27%

cas (4)/cas (2) = 17.96/13.86 = 140.24%

Epreuve où L= 550mm - H= 38mm 0.9281



valeurs filtrées du graphique.

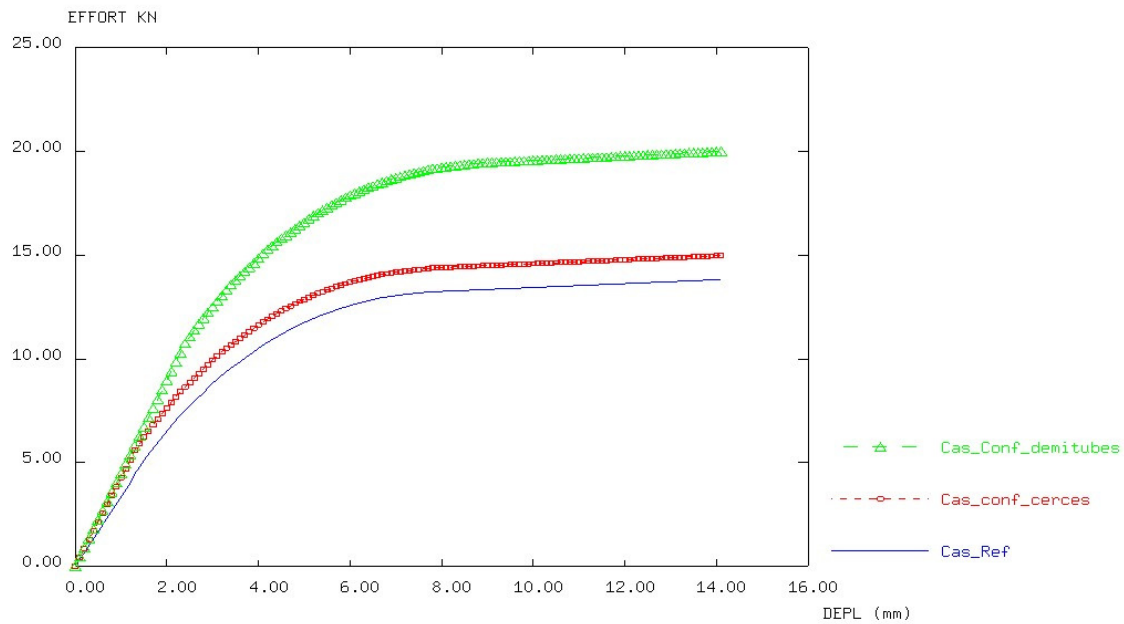
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.44E-01	3.38E+00	6.47E+00	1.03E+01	1.39E+01	1.48E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.84E-01	3.54E+00	7.08E+00	1.29E+01	1.80E+01	1.96E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.87/12.80 = 108.36%

cas (4)/cas (2) = 18.01/13.87 = 140.67%

Epreuve où L= 550mm - H= 40mm 0.9368



valeurs filtrées du graphique.

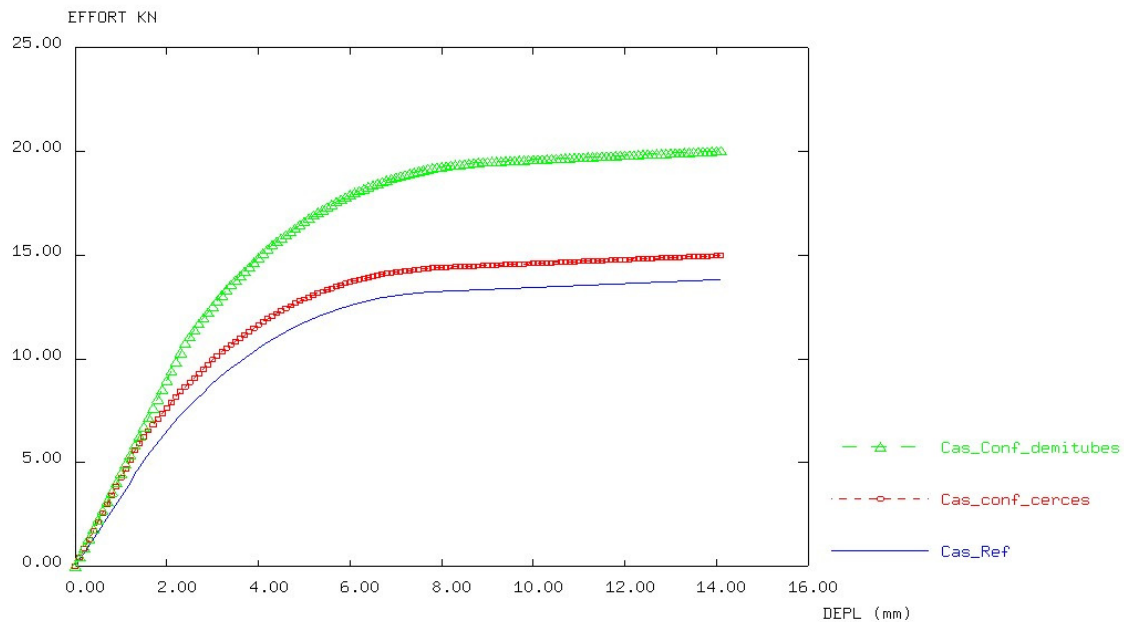
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.46E-01	3.38E+00	6.48E+00	1.03E+01	1.39E+01	1.48E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.86E-01	3.55E+00	7.10E+00	1.29E+01	1.81E+01	1.96E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.88/12.80 = 108.44%

cas (4)/cas (2) = 18.06/13.88 = 141.05%

Epreuve où L= 550mm - H= 42mm 0.9447



valeurs filtrées du graphique.

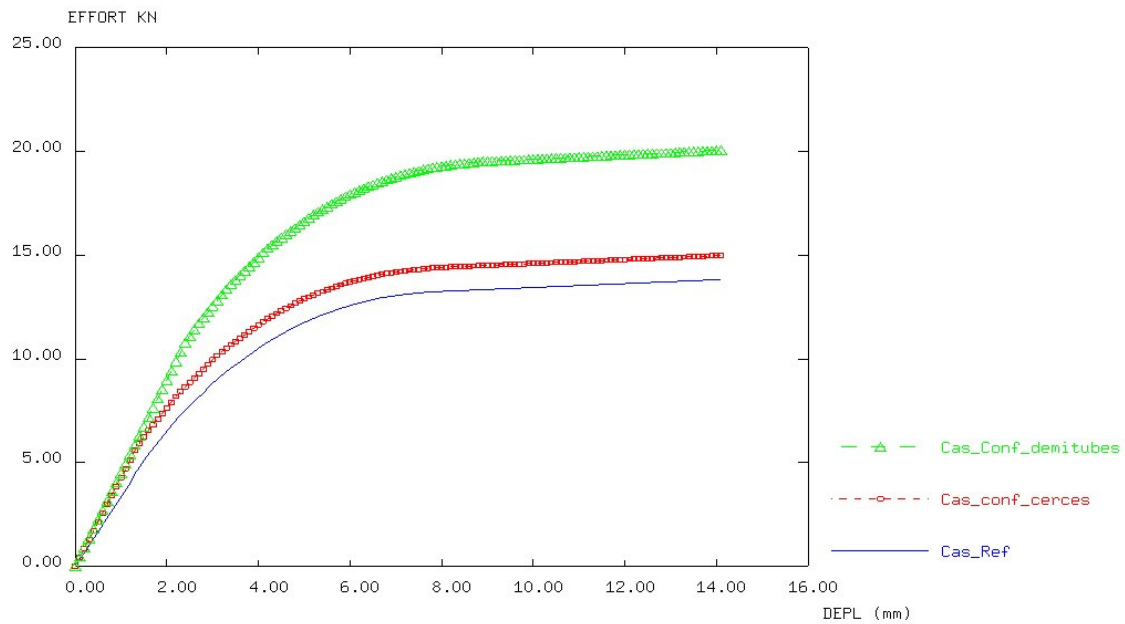
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.47E-01	3.39E+00	6.49E+00	1.03E+01	1.39E+01	1.48E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.88E-01	3.55E+00	7.11E+00	1.29E+01	1.81E+01	1.97E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.89/12.80 = 108.51%

cas (4)/cas (2) = 18.10/13.89 = 141.39%

Epreuve où L= 550mm - H= 44mm 0.952



valeurs filtrées du graphique.

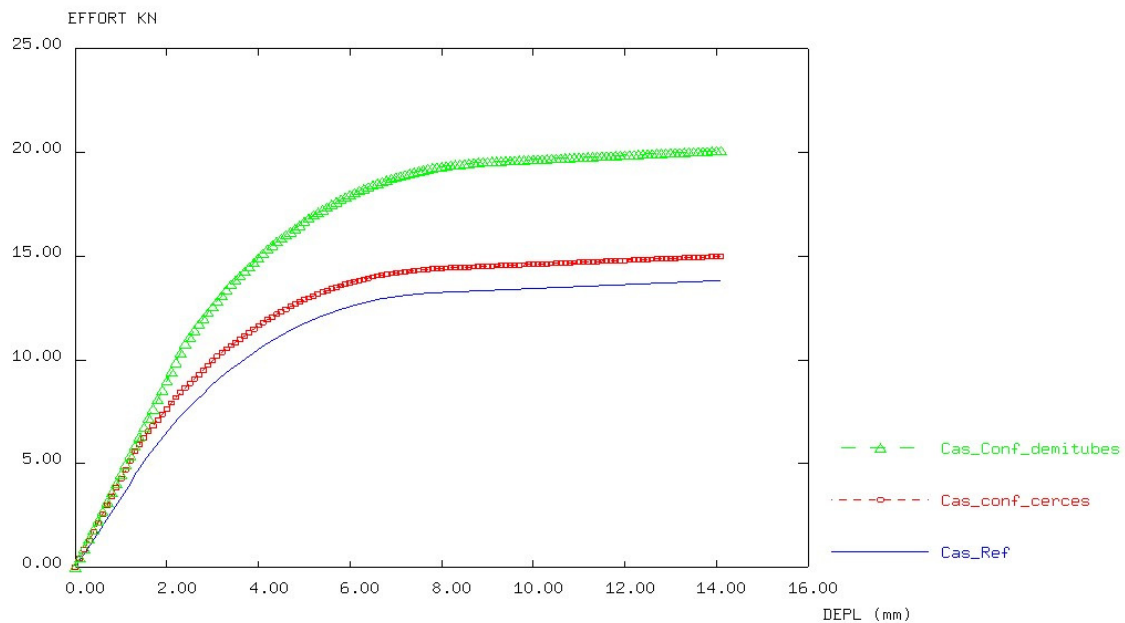
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.49E-01	3.39E+00	6.50E+00	1.03E+01	1.39E+01	1.48E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.90E-01	3.56E+00	7.12E+00	1.30E+01	1.81E+01	1.97E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.90/12.80 = 108.57%

cas (4)/cas (2) = 18.14/13.90 = 141.71%

Epreuve où L= 550mm - H= 46mm 0.9586



valeurs filtrées du graphique.

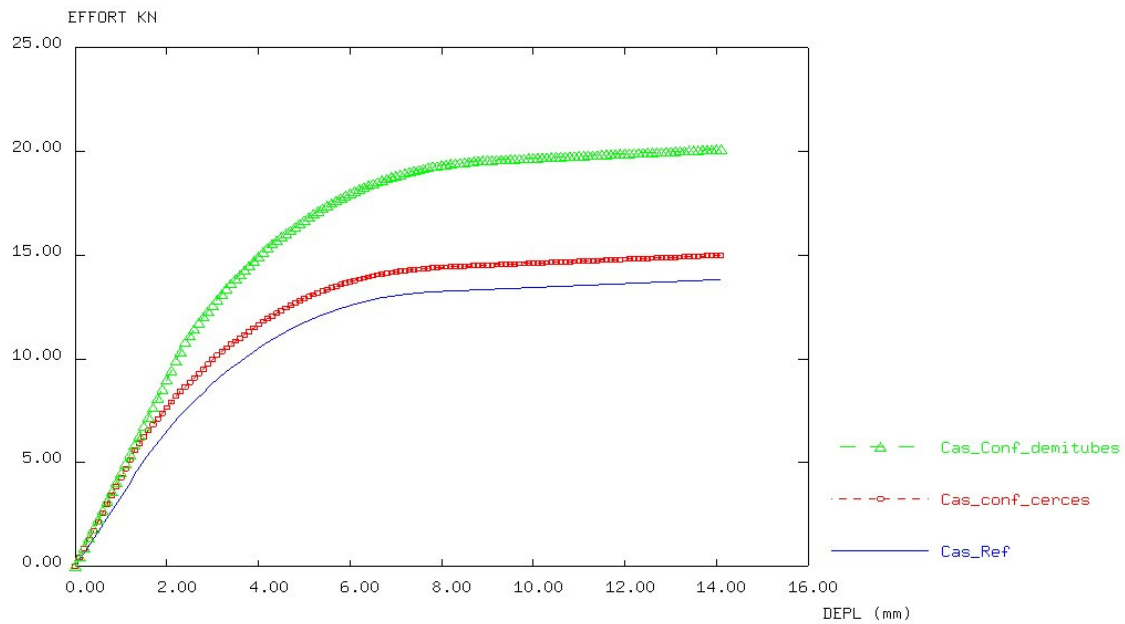
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.50E-01	3.40E+00	6.51E+00	1.03E+01	1.39E+01	1.48E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.91E-01	3.57E+00	7.14E+00	1.30E+01	1.82E+01	1.98E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.91/12.80 = 108.63%

cas (4)/cas (2) = 18.18/13.91 = 142.00%

Epreuve où L= 550mm - H= 48mm 0.9648



valeurs filtrées du graphique.

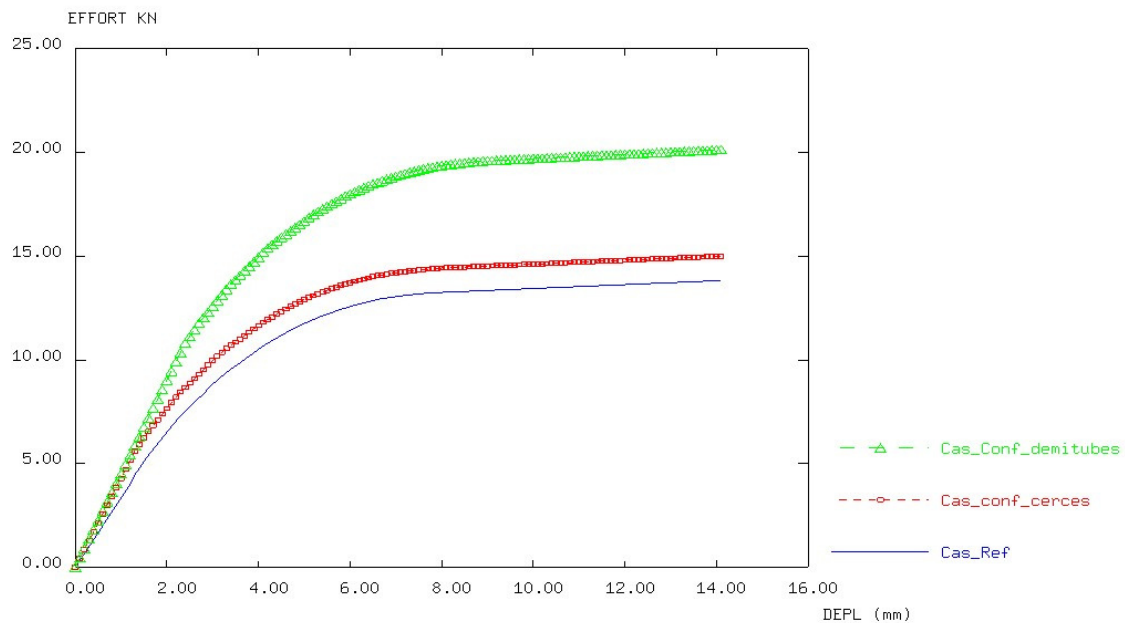
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.51E-01	3.40E+00	6.51E+00	1.03E+01	1.39E+01	1.48E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.93E-01	3.57E+00	7.15E+00	1.30E+01	1.82E+01	1.98E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.92/12.80 = 108.69%

cas (4)/cas (2) = 18.22/13.92 = 142.28%

Epreuve où L= 550mm - H= 50mm 0.9704



valeurs filtrées du graphique.

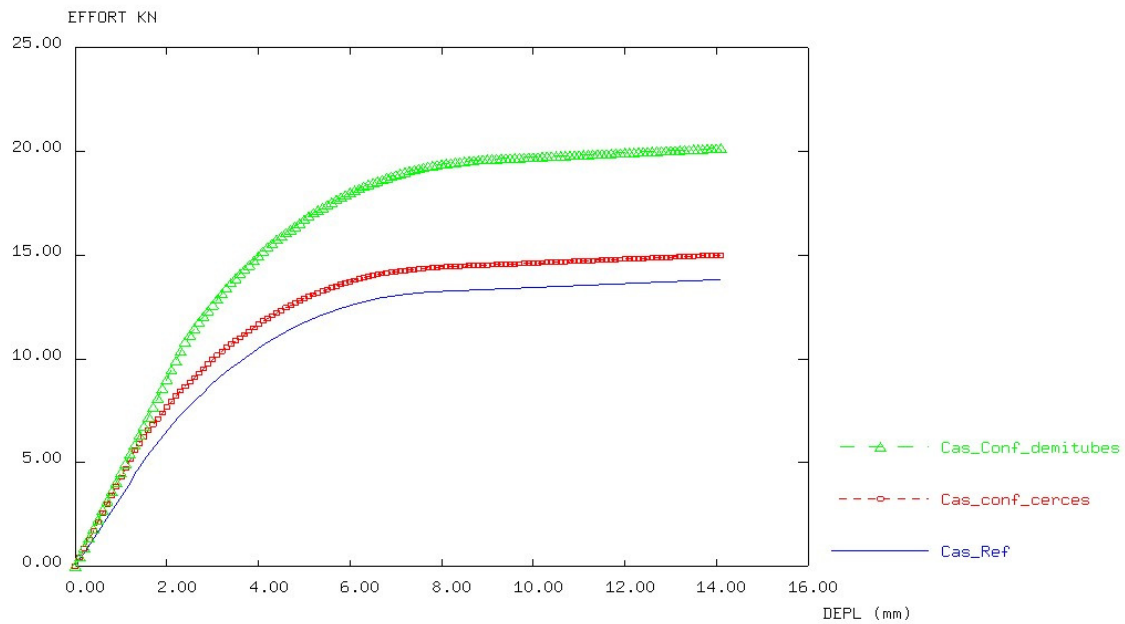
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.52E-01	3.41E+00	6.52E+00	1.03E+01	1.39E+01	1.48E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.94E-01	3.58E+00	7.16E+00	1.30E+01	1.82E+01	1.98E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.92/12.80 = 108.74%

cas (4)/cas (2) = 18.25/13.92 = 142.52%

Epreuve où L= 550mm - H= 52mm 0.9757



valeurs filtrées du graphique.

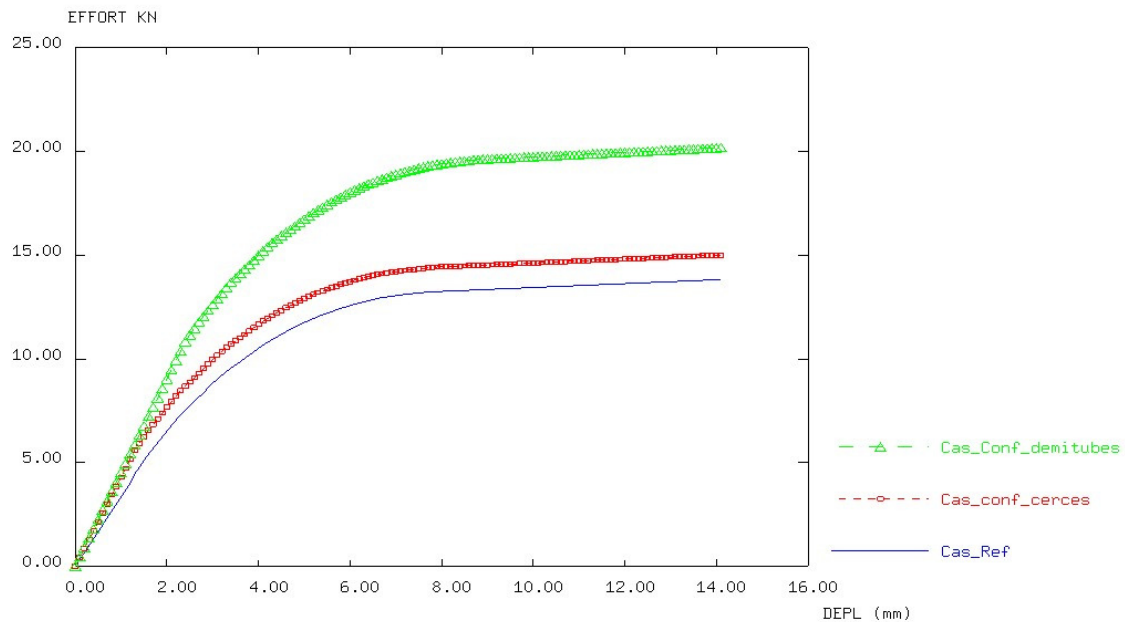
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN]poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN]avec cerces	0.00E+00	8.53E-01	3.41E+00	6.53E+00	1.03E+01	1.39E+01	1.49E+01
4	Effort [KN]avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.95E-01	3.58E+00	7.17E+00	1.30E+01	1.83E+01	1.99E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.93/12.80 = 108.79%

cas (4)/cas (2) = 18.28/13.93 = 142.75%

Epreuve où L= 550mm - H= 54mm 0.9805



valeurs filtrées du graphique.

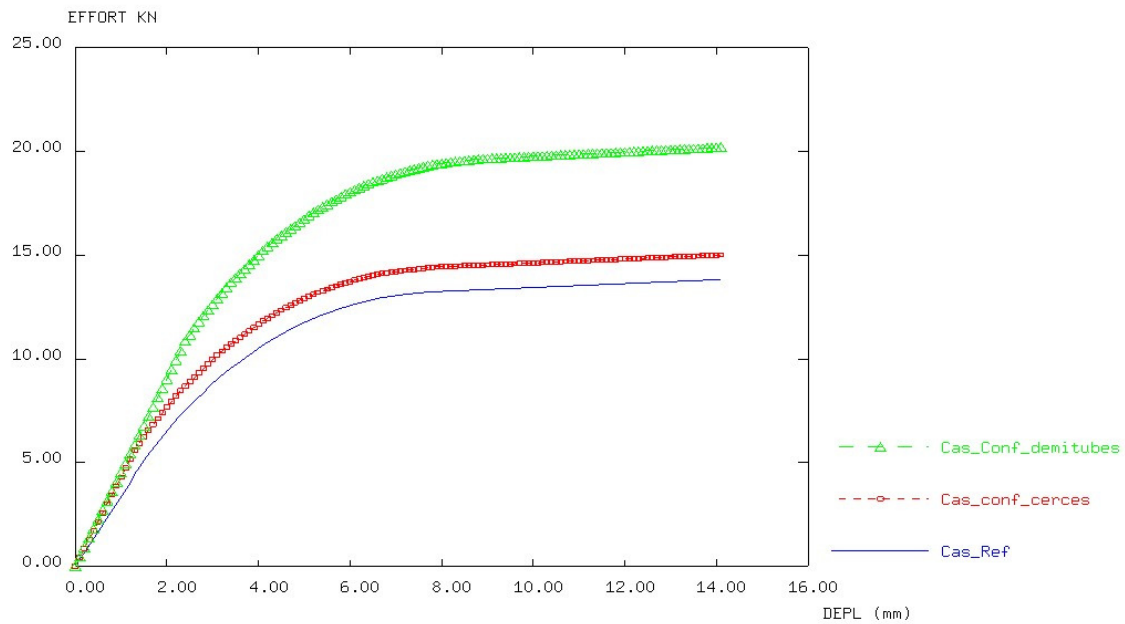
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN]poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN]avec cerces	0.00E+00	8.54E-01	3.42E+00	6.53E+00	1.03E+01	1.39E+01	1.49E+01
4	Effort [KN]avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.96E-01	3.59E+00	7.17E+00	1.31E+01	1.83E+01	1.99E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.93/12.80 = 108.83%

cas (4)/cas (2) = 18.30/13.93 = 142.96%

Epreuve où L= 550mm - H= 56mm 0.985



valeurs filtrées du graphique.

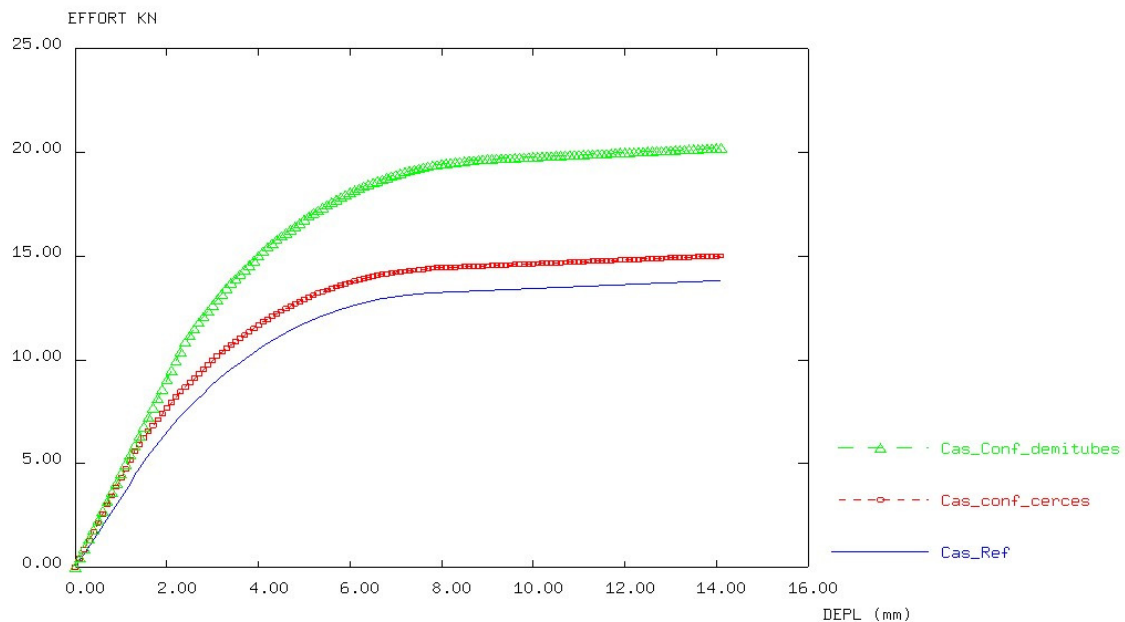
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.55E-01	3.42E+00	6.54E+00	1.03E+01	1.39E+01	1.49E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.97E-01	3.59E+00	7.18E+00	1.31E+01	1.83E+01	1.99E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.94/12.80 = 108.87%

cas (4)/cas (2) = 18.33/13.94 = 143.16%

Epreuve où L= 550mm - H= 58mm 0.9893



valeurs filtrées du graphique.

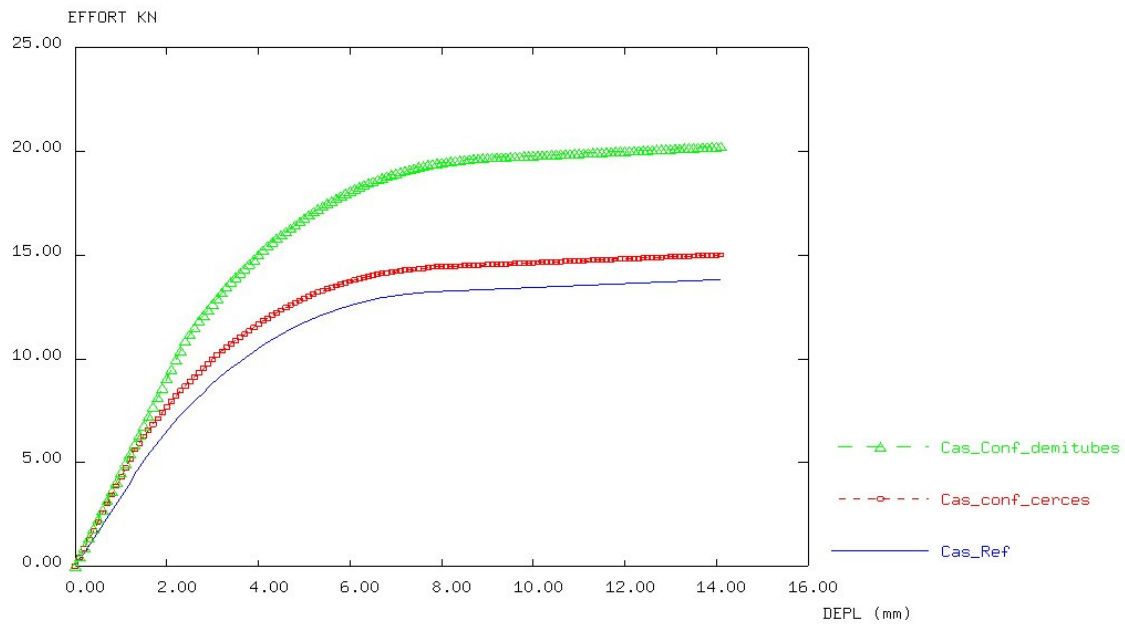
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.56E-01	3.42E+00	6.54E+00	1.03E+01	1.39E+01	1.49E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.98E-01	3.59E+00	7.19E+00	1.31E+01	1.84E+01	2.00E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.94/12.80 = 108.91%

cas (4)/cas (2) = 18.35/13.94 = 143.35%

Epreuve où L= 550mm - H= 60mm 0.9932



valeurs filtrées du graphique.

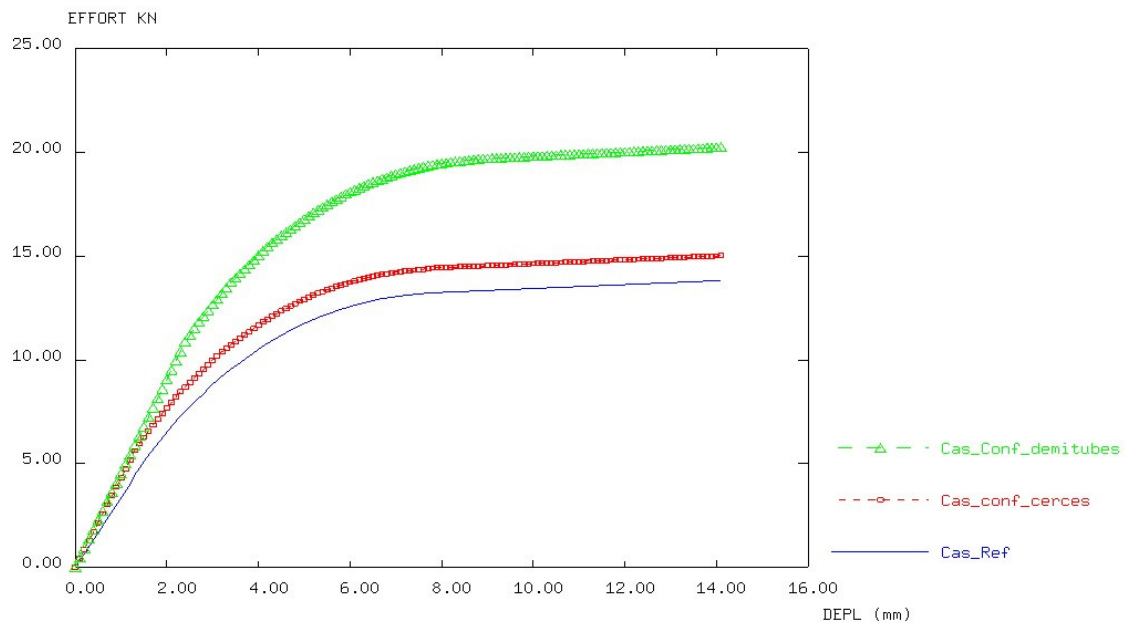
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.57E-01	3.43E+00	6.55E+00	1.04E+01	1.39E+01	1.49E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	8.99E-01	3.60E+00	7.20E+00	1.31E+01	1.84E+01	2.00E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.95/12.80 = 108.94%

cas (4)/cas (2) = 18.37/13.95 = 143.52%

Epreuve où L= 550mm - H= 62mm 0.9969



valeurs filtrées du graphique.

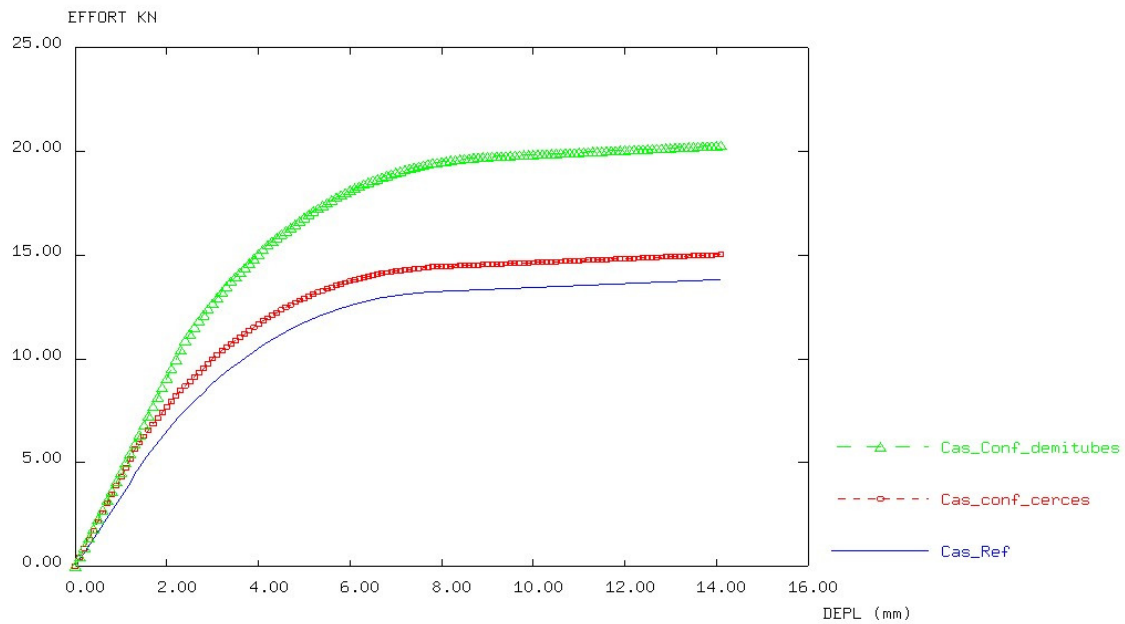
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.57E-01	3.43E+00	6.55E+00	1.04E+01	1.40E+01	1.49E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	9.00E-01	3.60E+00	7.20E+00	1.31E+01	1.84E+01	2.00E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.95/12.80 = 108.98%

cas (4)/cas (2) = 18.40/13.95 = 143.68%

Epreuve où L= 550mm - H= 64mm 1.0004



valeurs filtrées du graphique.

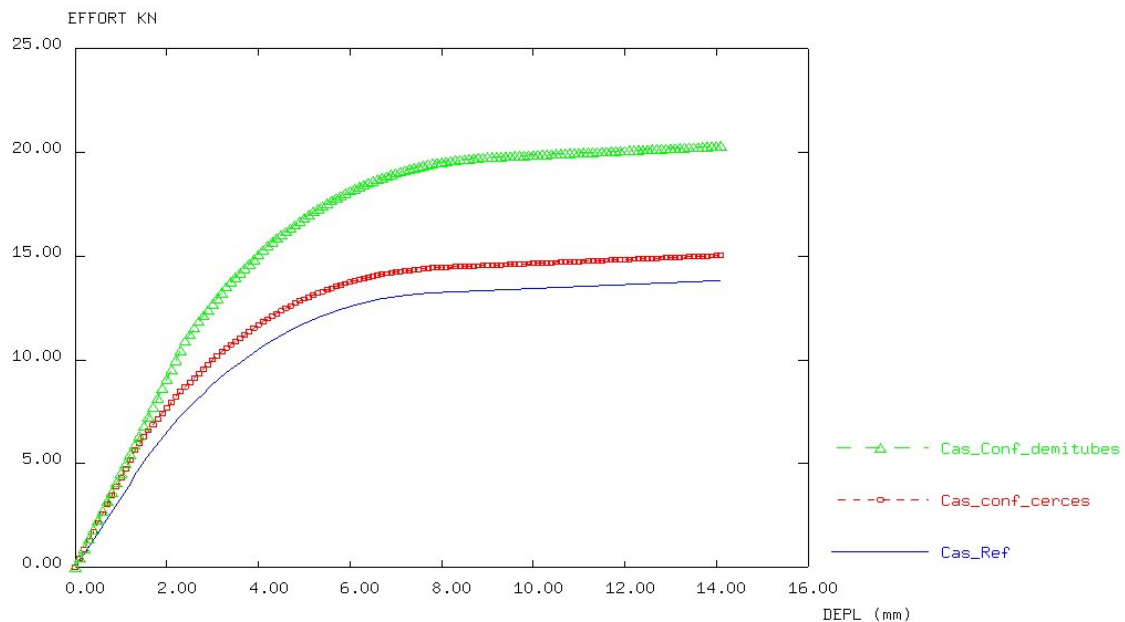
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.58E-01	3.43E+00	6.56E+00	1.04E+01	1.40E+01	1.49E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	9.01E-01	3.61E+00	7.21E+00	1.31E+01	1.84E+01	2.00E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.96/12.80 = 109.01%

cas (4)/cas (2) = 18.42/13.96 = 143.84%

Epreuve où L= 550mm - H= 66mm 1.0036



valeurs filtrées du graphique.

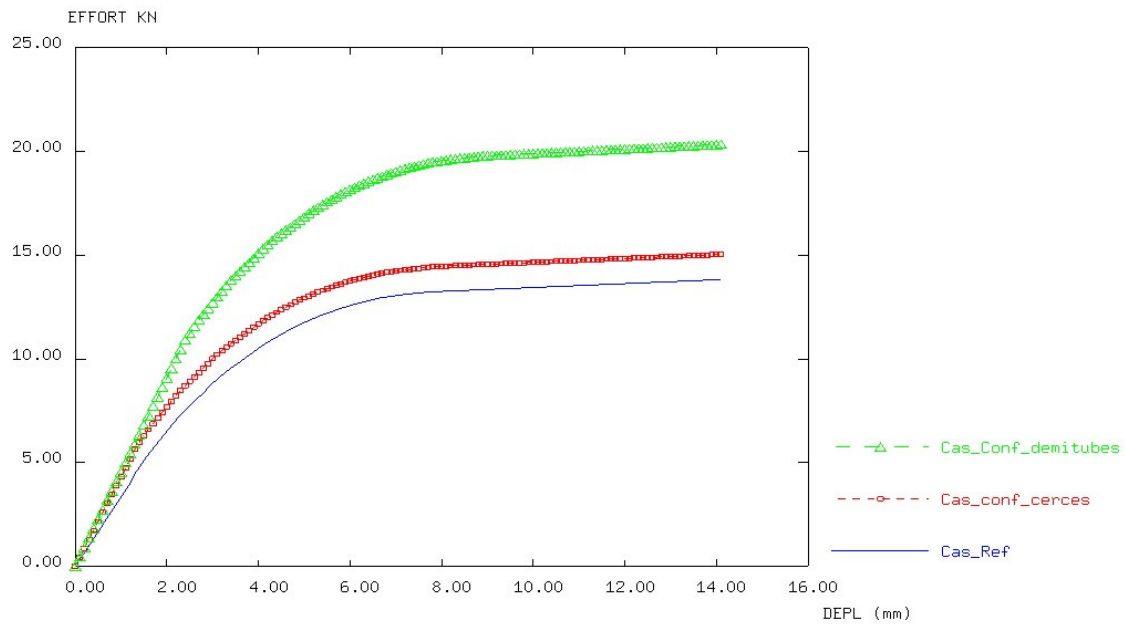
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.59E-01	3.43E+00	6.56E+00	1.04E+01	1.40E+01	1.49E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	9.02E-01	3.61E+00	7.22E+00	1.32E+01	1.84E+01	2.00E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.96/12.80 = 109.04%

cas (4)/cas (2) = 18.43/13.96 = 143.98%

Epreuve où L= 550mm - H= 68mm 1.0067



valeurs filtrées du graphique.

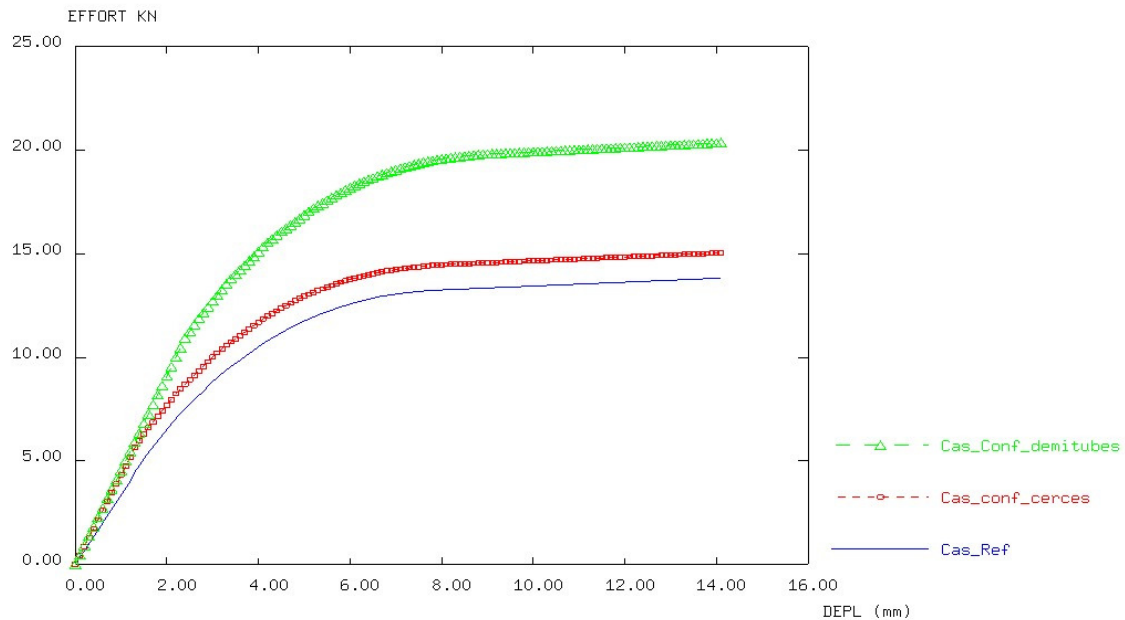
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.59E-01	3.44E+00	6.56E+00	1.04E+01	1.40E+01	1.49E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	9.03E-01	3.61E+00	7.22E+00	1.32E+01	1.85E+01	2.01E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.96/12.80 = 109.07%

cas (4)/cas (2) = 18.45/13.96 = 144.11%

Epreuve où L= 550mm - H= 70mm 1.0096



valeurs filtrées du graphique.

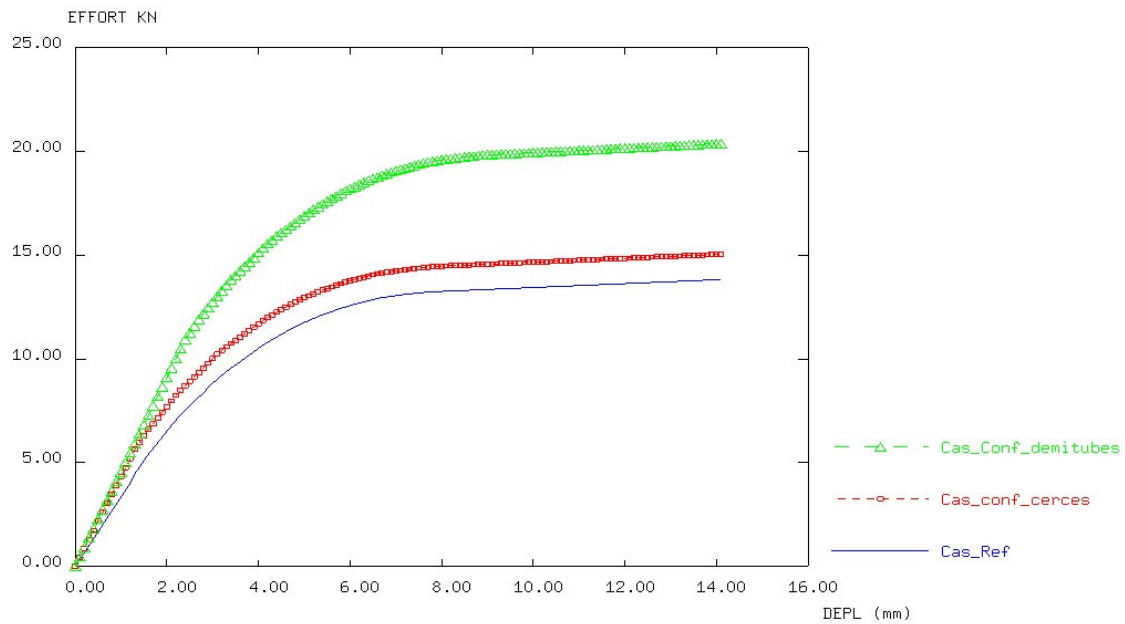
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.60E-01	3.44E+00	6.57E+00	1.04E+01	1.40E+01	1.49E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	9.03E-01	3.61E+00	7.23E+00	1.32E+01	1.85E+01	2.01E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.97/12.80 = 109.09%

cas (4)/cas (2) = 18.47/13.97 = 144.24%

Epreuve où L= 550mm - H= 72mm 1.0124



valeurs filtrées du graphique.

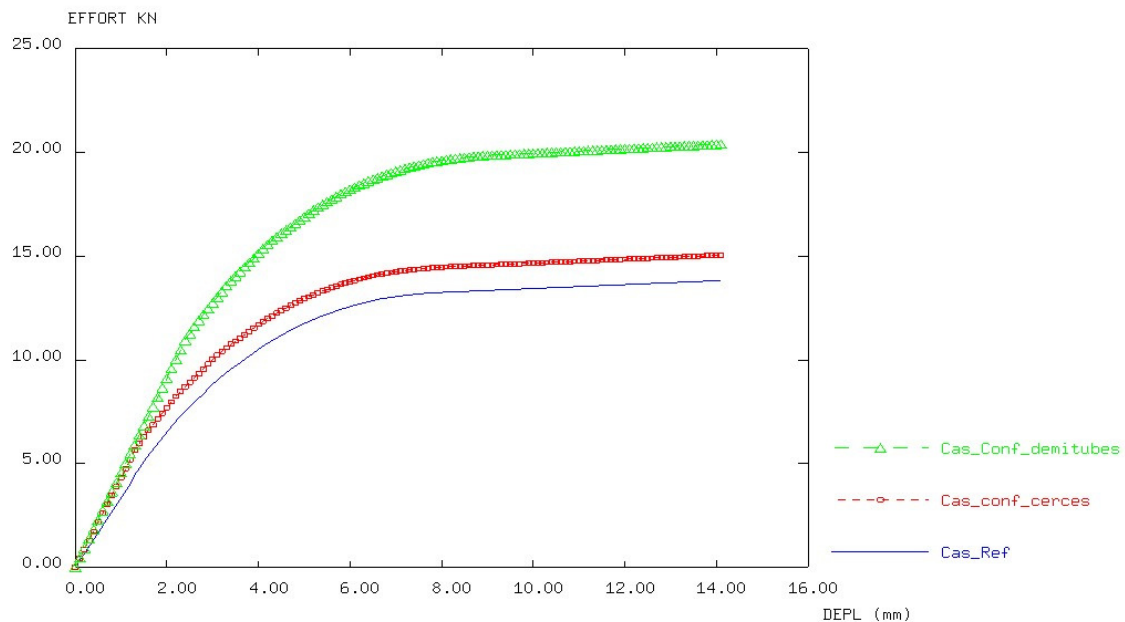
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.60E-01	3.44E+00	6.57E+00	1.04E+01	1.40E+01	1.49E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	9.04E-01	3.62E+00	7.23E+00	1.32E+01	1.85E+01	2.01E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.97/12.80 = 109.12%

cas (4)/cas (2) = 18.48/13.97 = 144.36%

Epreuve où L= 550mm - H= 74mm 1.015



valeurs filtrées du graphique.

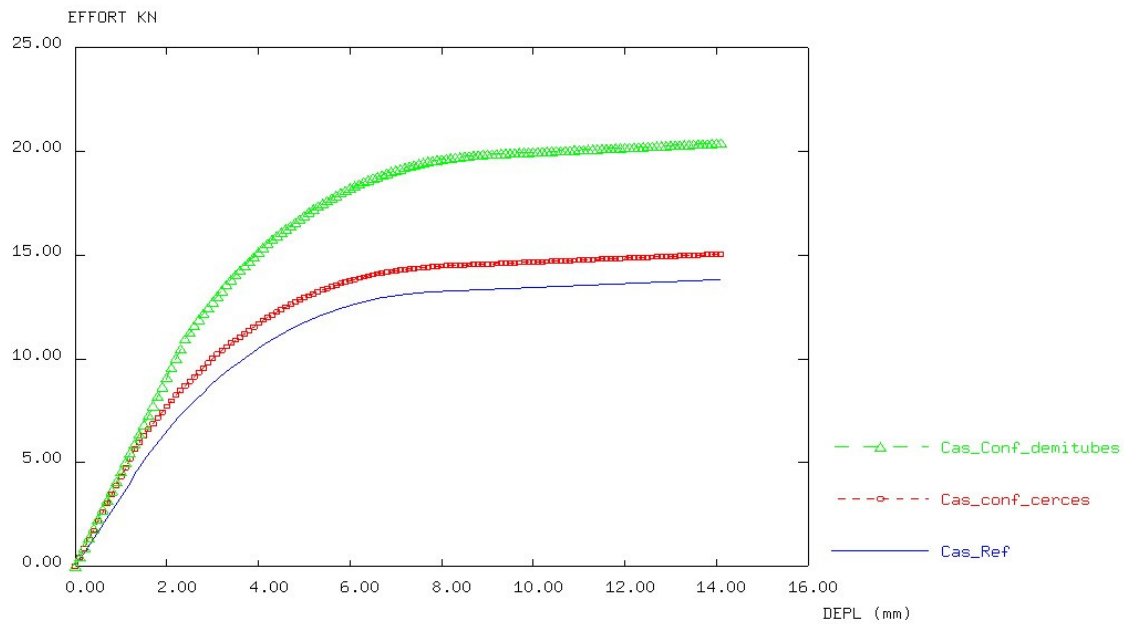
1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.61E-01	3.44E+00	6.57E+00	1.04E+01	1.40E+01	1.49E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	9.05E-01	3.62E+00	7.24E+00	1.32E+01	1.85E+01	2.01E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.97/12.80 = 109.14%

cas (4)/cas (2) = 18.50/13.97 = 144.48%

Epreuve où L= 550mm - H= 78mm 1.0198



valeurs filtrées du graphique.

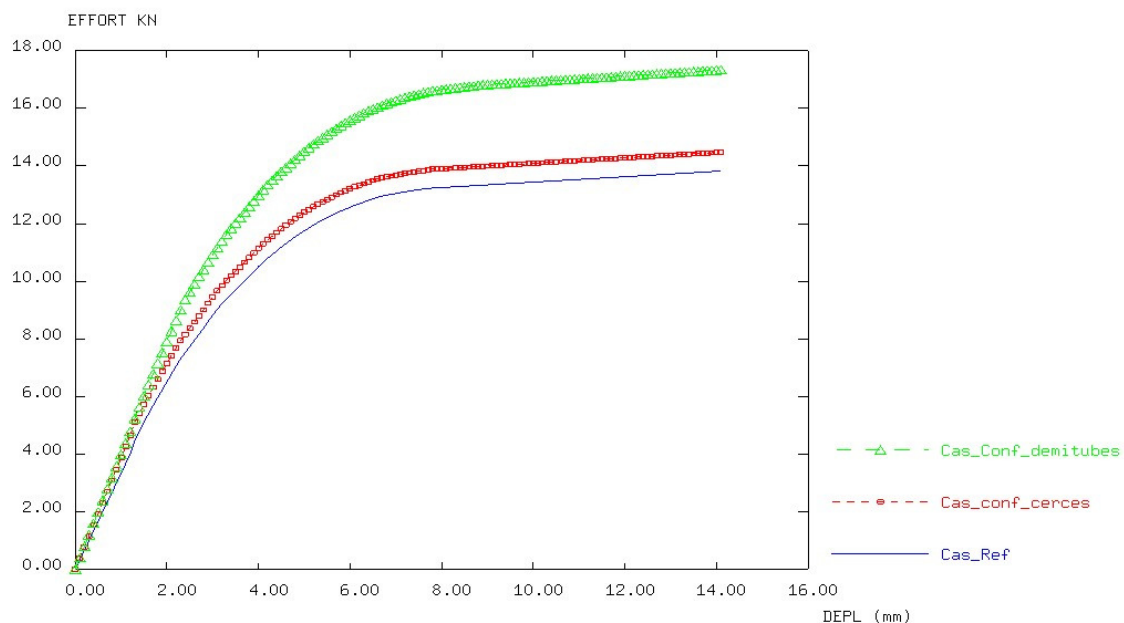
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.62E-01	3.45E+00	6.58E+00	1.04E+01	1.40E+01	1.49E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	9.06E-01	3.62E+00	7.25E+00	1.32E+01	1.85E+01	2.02E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.98/12.80 = 109.18%

cas (4)/cas (2) = 18.52/13.98 = 144.69%

Epreuve où L= 550mm - H= 82mm 1.0242



valeurs filtrées du graphique.

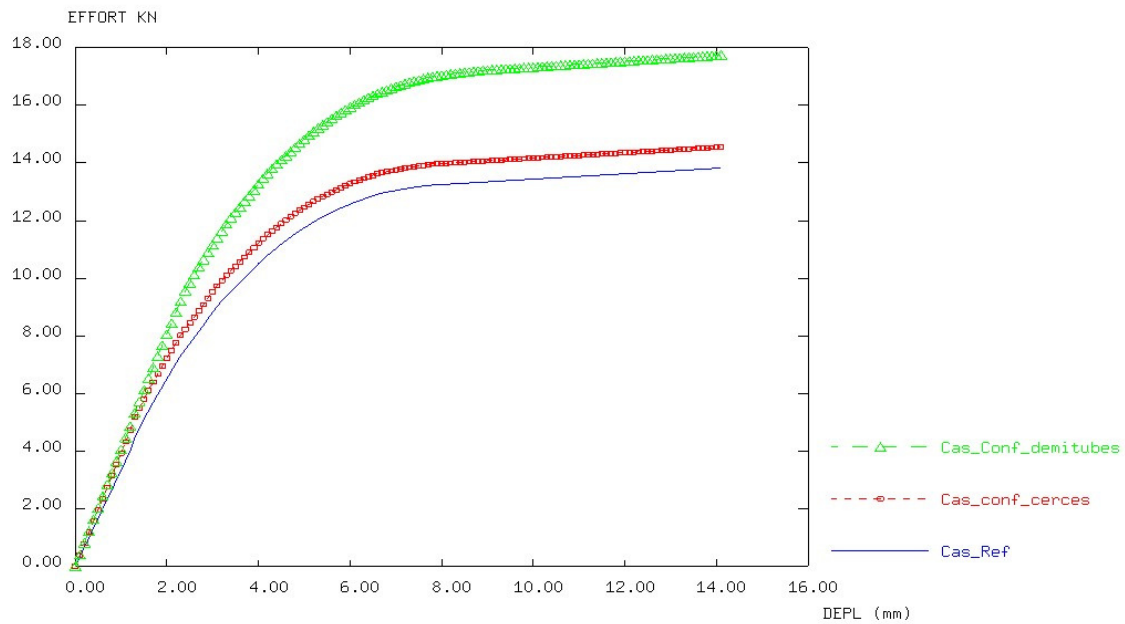
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.63E-01	3.45E+00	6.58E+00	1.04E+01	1.40E+01	1.49E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	9.07E-01	3.63E+00	7.25E+00	1.32E+01	1.85E+01	2.02E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.98/12.80 = 109.22%

cas (4)/cas (2) = 18.55/13.98 = 144.88%

Epreuve où L= 550mm - H= 86mm 1.0281



valeurs filtrées du graphique.

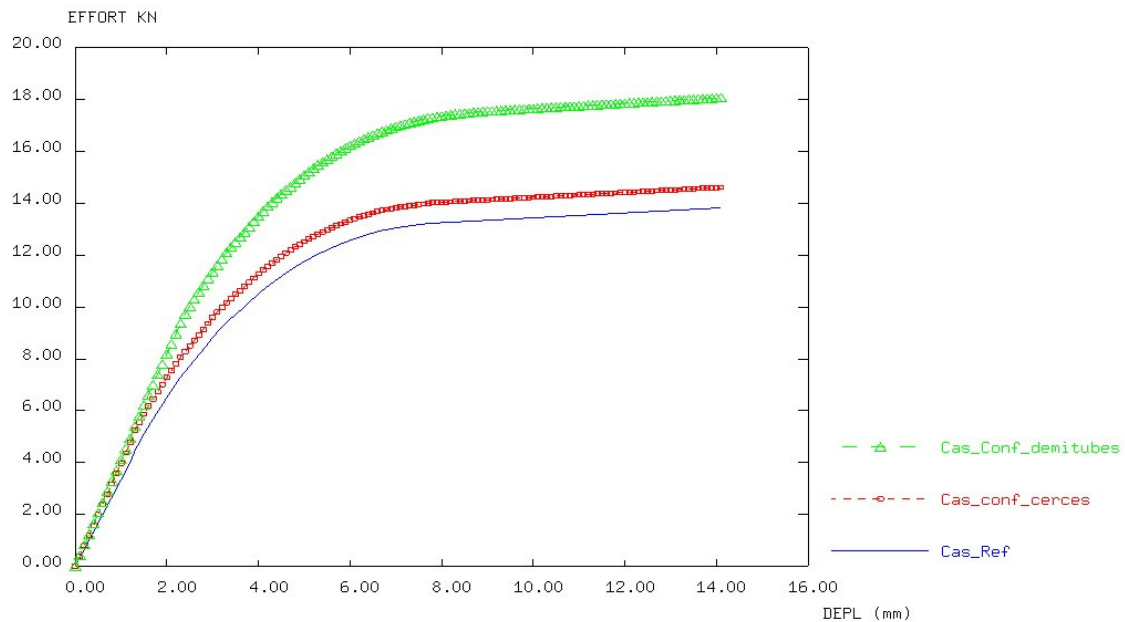
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.63E-01	3.45E+00	6.59E+00	1.04E+01	1.40E+01	1.49E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	9.08E-01	3.63E+00	7.26E+00	1.33E+01	1.86E+01	2.02E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.99/12.80 = 109.26%

cas (4)/cas (2) = 18.57/13.99 = 145.05%

Epreuve où L= 550mm - H= 90mm 1.0317



valeurs filtrées du graphique.

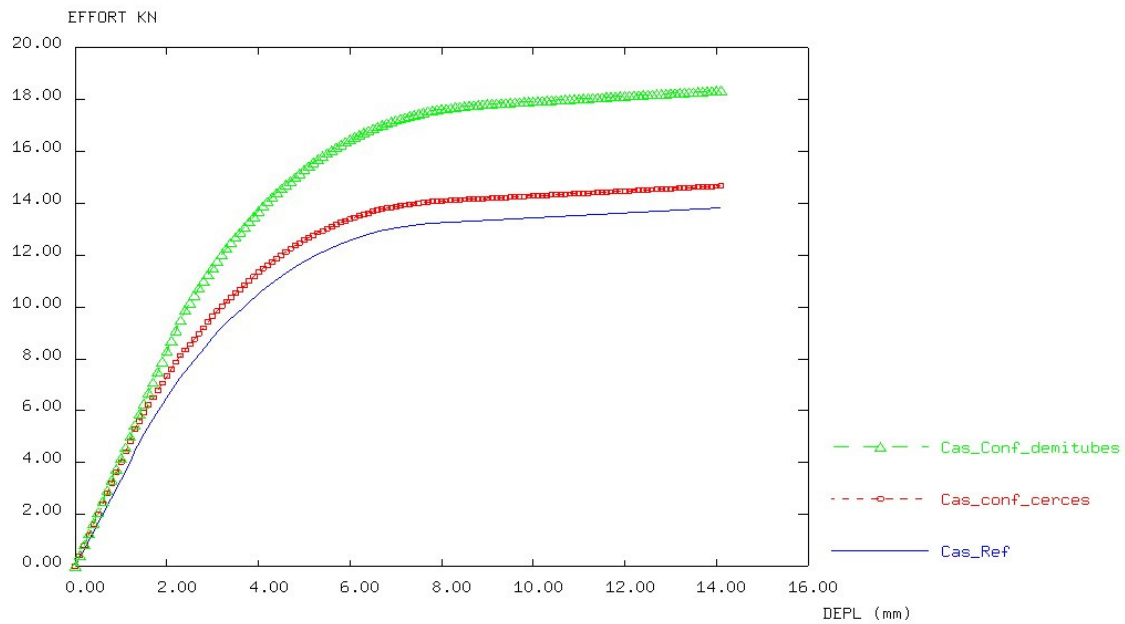
1 Déplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2 Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3 Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.64E-01	3.46E+00	6.59E+00	1.04E+01	1.40E+01	1.49E+01
4 Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	9.08E-01	3.63E+00	7.27E+00	1.33E+01	1.86E+01	2.02E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 13.99/12.80 = 109.29%

cas (4)/cas (2) = 18.59/13.99 = 145.21%

Epreuve où L= 550mm - H= 94mm 1.035

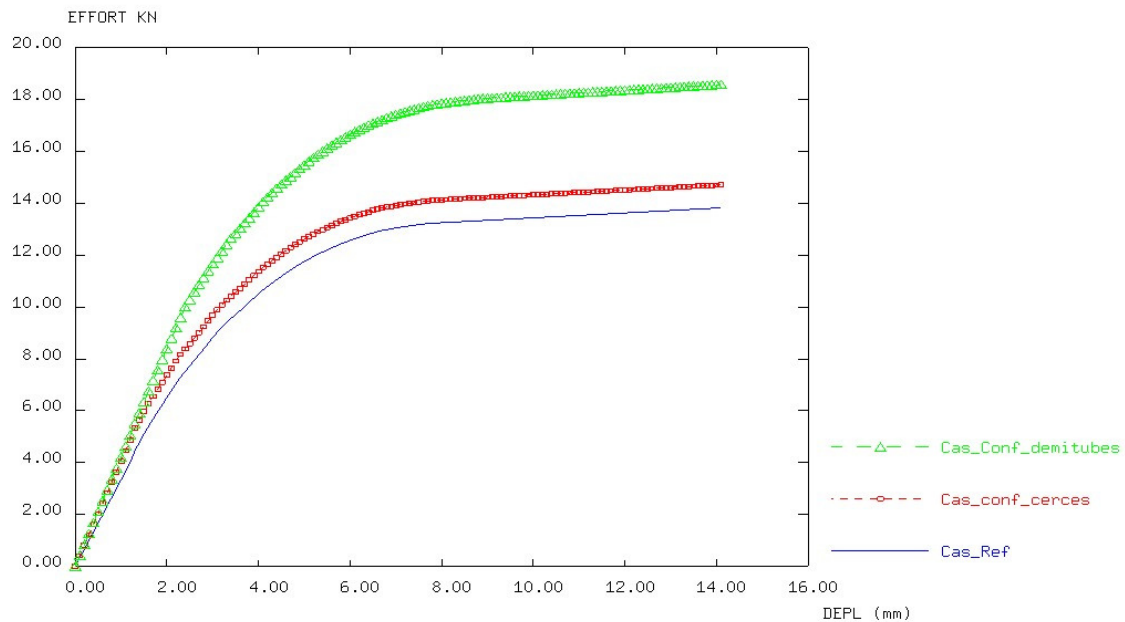


rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 14.00/12.80 = 109.32%

cas (4)/cas (2) = 18.61/14.00 = 145.35%

Epreuve où L= 550mm - H= 98mm 1.038

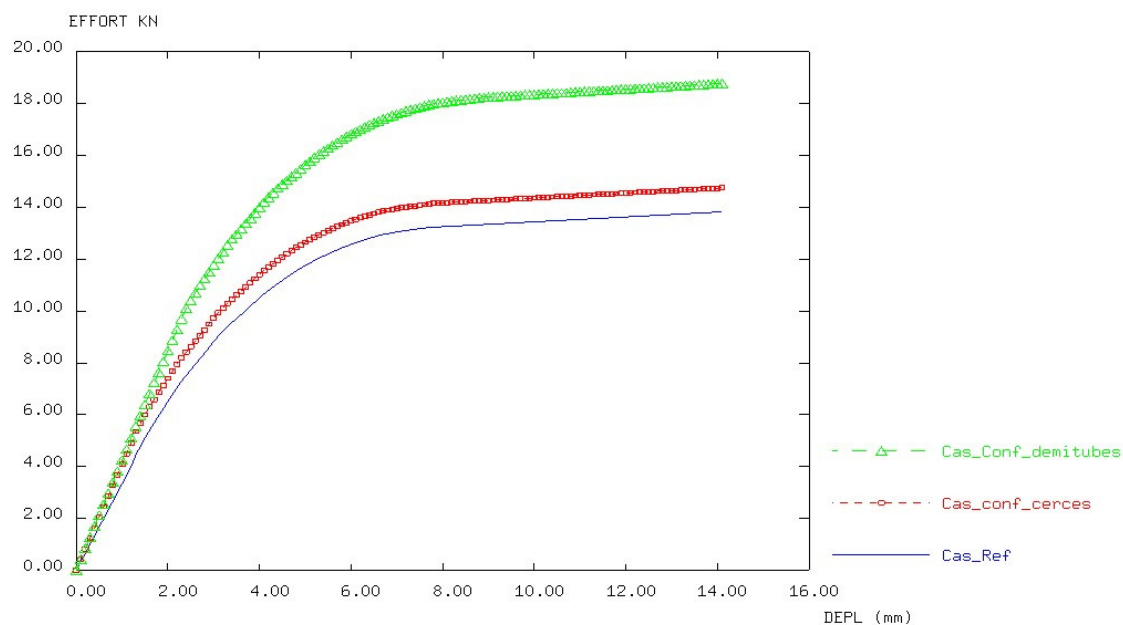


rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 14.00/12.80 = 109.35%

cas (4)/cas (2) = 18.63/14.00 = 145.48%

Epreuve où L= 550mm - H= 99mm 1.0388



valeurs filtrées du graphique.

1	Deplacement (mm)	0.00E+00	2.00E-01	8.00E-01	1.60E+00	3.20E+00	6.40E+00	1.28E+01
2	Effort [KN] poutre réf	0.00E+00	6.66E-01	2.66E+00	5.40E+00	9.21E+00	1.28E+01	1.37E+01
3	Effort [KN] avec cerces	0.00E+00	8.65E-01	3.46E+00	6.60E+00	1.04E+01	1.40E+01	1.49E+01
4	Effort [KN] avec cerces et demi tubes	0.00E+00	9.10E-01	3.64E+00	7.28E+00	1.33E+01	1.86E+01	2.03E+01

rapport des efforts pour un déplacement seuil au même effort sur la poutre de référence

cas (3)/cas (2) = 14.00/12.80 = 109.35%

cas (4)/cas (2) = 18.63/14.00 = 145.52%