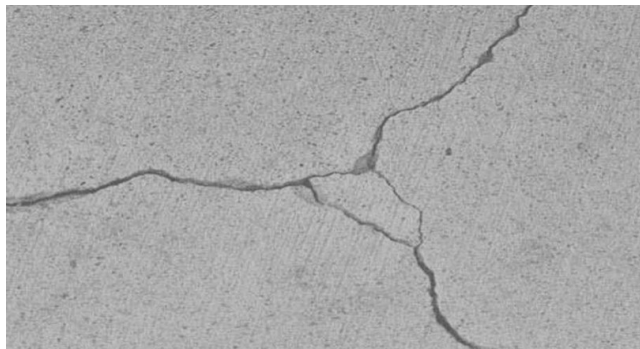


PROJET DE CALCUL AUX ELEMENTS FINIS CAST3M 2000

Sujet: Étude de la fissuration du béton, et des conséquences d'un mauvais placement des armatures dans une poutre en béton armé sur deux appuis



Elise BARON
Magali DOGNA

ISA BTP 5^{ème} année

SOMMAIRE

I - INTRODUCTION.....	4
II - MODELISATION.....	5
1- Données du problème:.....	5
2- Caractéristiques des matériaux:.....	7
III - Étude de l'ouverture des fissures.....	9
1- Calcul linéaire.....	10
2- Calcul non linéaire.....	11
1.1 Première approche.....	12
1.2 Deuxième approche.....	14
1.3 Modélisation des cales.....	15
IV - Intégration dans le calcul de l'hétérogénéité du matériau béton.....	20
V – Comparaison des résultats avec les résultats des expériences en laboratoire.....	22
V – Conséquence du positionnement des armatures.....	23
VI – CONCLUSION.....	25

I - INTRODUCTION

Ce projet a pour objectif d'utiliser et de se familiariser avec la méthode de calcul aux éléments finis, par le biais du logiciel de calcul CAST3M 2000.

Nous avons décidé de nous intéresser à un sujet de travaux pratiques de béton armé dispensé à l'ISA BTP. Il s'agit de l'étude de la fissuration d'une poutre en béton armé sur deux appuis, et des conséquences engendrées par un mauvais placement des armatures à l'intérieur de la poutre, elle-même soumise à une force ponctuelle perpendiculaire.

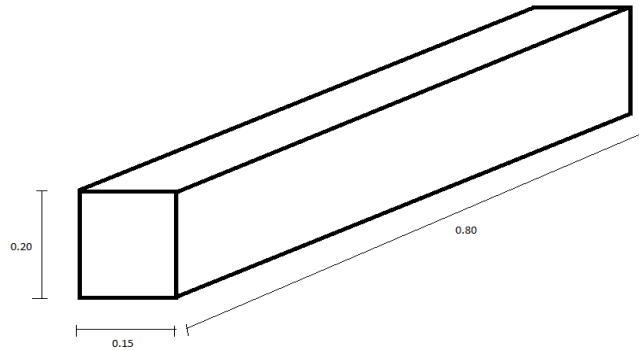
Grâce au logiciel CAST3M, nous avons modélisé la poutre sous les efforts et nous avons pu obtenir un graphique de représentation des efforts dans la poutre, et des axes de fissuration.

A travers ce rapport, il s'agira donc d'expliquer notre démarche et notre réflexion afin de nous rapprocher au plus possible du modèle dans la réalité.

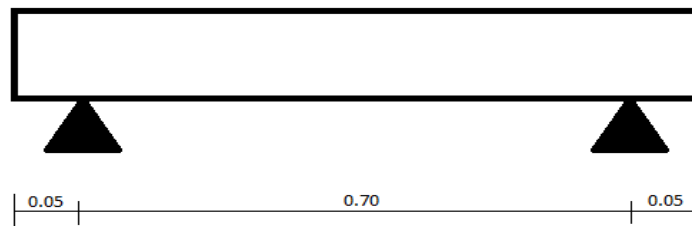
II - MODELISATION

1- Données du problème:

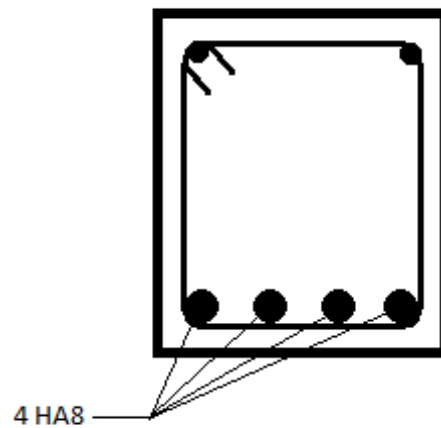
Étude d'une poutre en béton armé de 15x20x80cm:



- 70cm entre les deux appuis



- Armature en partie basse: 4 HA8



- Enrobage: 2cm
- Cadres transversaux: 1 à chaque extrémité (négligés dans notre calcul)

Pour commencer, nous avons donc modélisé la poutre et les armatures qu'elle contient en 2D.

*** Modélisation Problème 2D**

nha=4;
diam1=8.E-3;
sect1=nha*pi*(diam1**2)/4;
ft=3.E6;
GF=100.;

opti dime 2 elem tri3;

*** Paramètres du problème**

DENS1=1.E-2;
SIGE=500.E6;
DENSITE DENS1;
EP1=0.2;

***Points maîtres**

densite dens1;
P0=0. 0.;
P1=5.E-2 0.;
P2=40.E-2 0.;
P3=75.E-2 0.;
P4=80.E-2 0.;
TRACER (P0 et P1 ET P2 ET P3 ET P4);

***Construction du contour**

D1=DROI P0 P1;
D2=DROI P1 P2;
D3=DROI P2 P3;
D4=DROI P3 P4;
LIG1=D1 ET D2 ET D3 ET D4;
TRACER(LIG1);

***Translation de la première ligne pour la ligne moyenne d'armatures**

N1=1.;
VEC1=0. 2.e-2;

SURF1=LIG1 TRANSLATION VEC1;
arm1=surf1 cote 3 coul rouge;
TRACER(arm1);

***Translation de la seconde ligne pour la ligne supérieure de la poutre**

VEC2=0. 20.e-2;
SURF2=LIG1 TRANSLATION VEC2;
surfbet=surf1 et surf2 coul bleu;
tracer(arm1 et surfbet);

2- Caractéristiques des matériaux:

Béton E=30 000 MPA
 C25/30
 2500 kg/m³

Acier E=210 000 MPA
 HA8
 S235
 0,395 kg/ml

Nous avons donc inscrit les caractéristiques de l'acier dans notre programme:

**caractéristiques de l'acier*

Mod1=modele arm1 mecanique elastique plastique parfait barre;

mat1=mate mod1 youn 2.1e11 nu 0.20 SIGY SIGE SECT sect1;

rig1=rigi mod1 mat1;

Pour les caractéristiques du béton, nous avons utilisé le modèle d'endommagement de MAZARS, permettant une meilleure approche du calcul d'ouverture de fissures. En effet, la courbe d'élasticité du béton armé soumis à la flexion étant croissante puis décroissante, deux valeurs de déformation peuvent correspondre à une même contrainte, l'une dans la zone élastique (phase croissante) et l'autre dans la zone de fissuration (décroissante). Cette caractéristique est due à l'hétérogénéité du matériaux (fissuration aux points faibles).

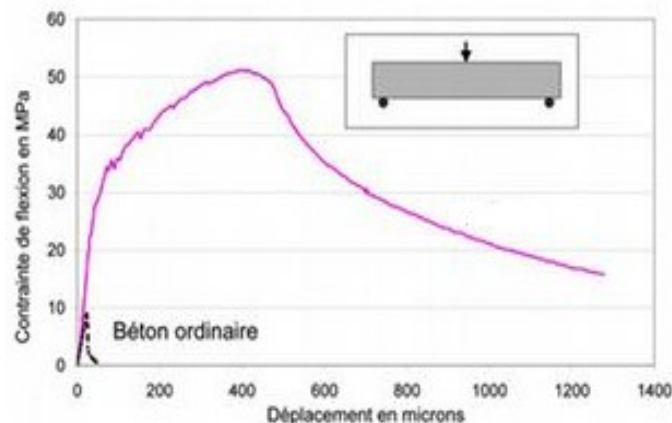


Illustration 1: Courbe contrainte/déformation d'une poutre en béton armé soumise à la flexion

Cette hétérogénéité pose aussi un problème pour le calcul de l'énergie de fissuration G_f (soit l'énergie qu'il faut dépenser pour créer 1m² de fissures). Lorsque l'on calcule une énergie W sur un élément donné de la poutre, $W = \int (\sigma \cdot \varepsilon \cdot h)$ on obtient un résultat numérique pour W . Or, plus la taille de l'élément étudié est petite, plus l'énergie tend vers 0, donc le calcul n'est pas objectif!

Le programme MAZARS permet alors de résoudre ce problème dans le programme en calculant

une énergie constante, et donc homogène. Pour cela il faut calculer les éléments optimaux du maillage pour le calcul de l'énergie.

***caractéristiques du béton**

Mod2=modele surfbet mecanique endommagement mazars ;

***Calcul des éléments optimaux du maillage**

mat0=mate mod2 btra 1;

intg1=intg mat0 mod1 elem;

*chh=intg1**0.5;*

*chbtra=chh*ft/Gf;*

cktr0=ft/(35e9);

mat2=mate mod1 youn 35e9 nu 0.28 btra chbtra atra -5 acom 1.4 ktr0 cktr0 bcom 1900 beta 1.06

dim3 ep1;

rig2=rigi mod2 mat2 ;

*** Conditions aux limites**

CL1=bloquer(P1) uy;

CL2=bloquer (P3) ux uy;

Les conditions limites CL1 et CL2 concernent les appuis de la poutre (un appui simple en P1 et une rotule en P3). La condition limite CL3 permet de bloquer le point d'application de la force.

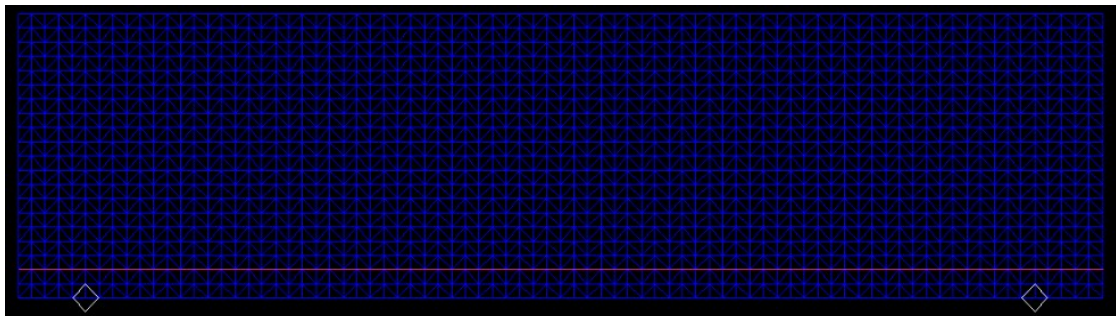


Illustration 2: Modélisation de l'éprouvette

III - Étude de l'ouverture des fissures

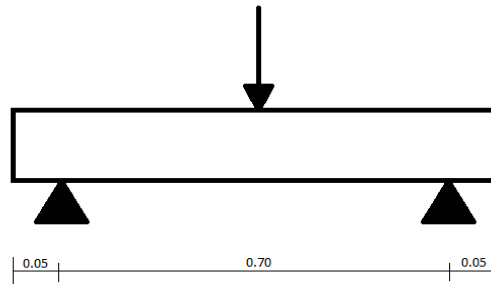


Illustration 3: Chargement à imposer

Si on impose un chargement, le programme nous donnera la valeur des déformations en fonction de ce chargement, jusqu'à atteindre le chargement maximum (rupture de l'éprouvette). A partir de cette valeur, le programme ne rencontrera plus de solutions et se lancera dans des itérations importantes sans résultats (illustration 2).

Il est donc plus judicieux d'imposer les déformations grâce à l'opérateur DEPI, pour que le programme nous donne la valeur des chargements correspondants, afin de trouver le chargement maximum avant rupture (illustration 3).

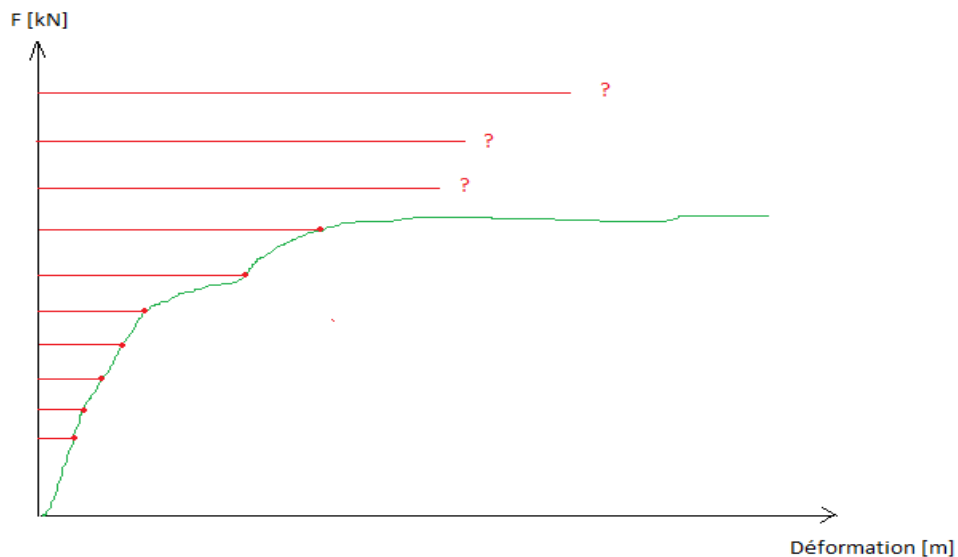


Illustration 4: Chargement imposé

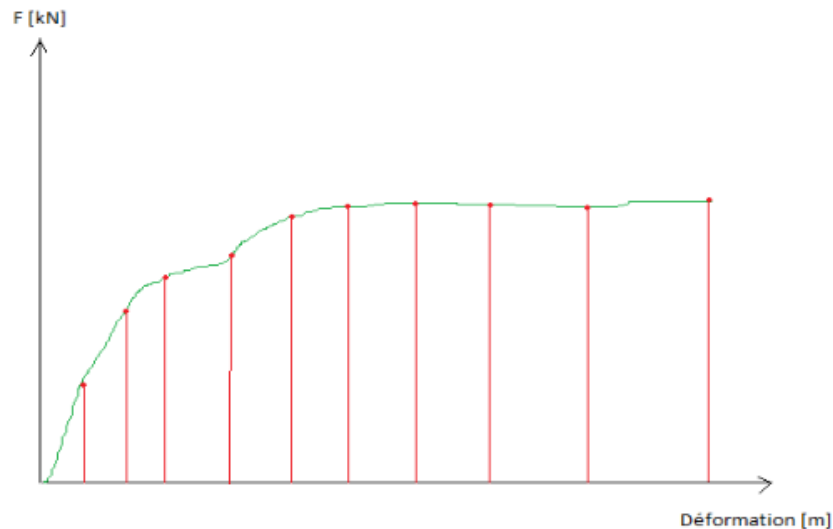


Illustration 5: Déformation imposée

*** Imposition du déplacement**

```
chp0=depi cl3 -1.e-2;
PROG1=PROG 0. 100.;
EVOL1=EVOL MANU PROG1 PROG1;
CHAR1=CHARGEMENT EVOL1 chp0 DIMP;
```

1- Calcul linéaire

On fait d’abord un calcul linéaire pour vérifier nos hypothèses (conditions limites etc...):

- On cherche la limite élastique (début de la fissuration)
- On cherche le déplacement qui va imposer $cktr(0)$
- On fait un exemple avec un déplacement de $1.e-2$, cela nous donne le chargement $max1=$

On peut ensuite faire une règle de 3 pour obtenir la valeur du chargement correspondant à $cktr(0)$, la limite élastique. La limite élastique est donc atteinte pour une flèche de **$6,39.10^5$ m.**

$cktr(0) / max1 * 1.e-2$ (valeur du déplacement imposé)

L’opérateur « epsi » permet de calculer la déformation.

*** Calcul élastique**

```
modtot=mod1 et mod2;
mattot=mat1 et mat2;
RITOT=rig1 et rig2 et cl1 et cl2 et cl3;
```

```

DEP1=RESOU RITOT chp0;
DEF1=defo DEP1 surfbet;
tracer DEF1;
eps1=epsi dep1 mod2;
max1=maxi eps1 avec (mots epxx);
list max1;
trac eps1 mod1;
delta1=cktr0/max1*1.e-2;
message ' la limite élastique est atteinte pour une flèche de '
delta1 ' m';

```

```

c:\castem11 projet_castem_baron_dogna_elas.dgibi
** Calcul élastique
** modtot=mod1 et mod2;
** mattot=mat1 et mat2;
** RITOT=rigl et rig2 et c11 et c12 et c13;
** DEP1=RESOU RITOT chp0;
Encombrement de la matrice : 183016 Facteur d'encombrement : 3.1729
**
** DEF1=defo DEP1 surfbet;
** tracer DEF1;
** eps1=epsi dep1 mod2;
** max1=maxi eps1 avec (mots epxx);
** list max1;
Ruel valant: 1.33989E-02
** trac eps1 mod1;
** delta1=cktr0/max1*1.e-2;
** message ' la limite élastique est atteinte pour une fleche de '
**                                delta1 ' m';
la limite élastique est atteinte pour une fleche de 6.39710E-05 m
**
**
**
**
FIN DE FICHIER SUR L'UNITE 3
LES DONNEES SONT MAINTENANT LUES SUR LE CLAVIER

```

2- Calcul non linéaire

On prend maintenant en compte le temps dans l'étude de la déformation de notre éprouvette. On utilise pour cela l'opérateur « PAS A PAS » qui permet de faire une étude non linéaire et d'avoir une force appliquée variable.

La formule $\sigma = E \cdot \varepsilon$ est valable pour un comportement élastique, mais en règle générale, c'est la formule $\sigma = E \cdot (1-D) \cdot \varepsilon$ qui est la plus juste, D étant l'endommagement de l'élément, compris entre 0 et 1.

Si D=0, on est en élastique (et on retrouve la première formule), mais si D=1, on n'est plus capable d'avoir de contraintes, c'est là qu'apparaissent fissures.

Pour ce faire, nous allons utiliser une échelle 1:1 entre le déplacement et le temps, afin de faciliter

les calculs: $d(t)=d(0) \times \lambda(t) \rightarrow$ on considère que $d(0)=1$.

On réalise un premier calcul Pas à pas de 25 itérations:

*** Calcul PAS A PAS**

```
T0=(6.4e-5/10.);
TAB1=TABLE;
TAB1.MODELE=modtot;
tab1.CARACTERISTIQUES=mattot;
TAB1.CHARGEMENT=char1;
TAB1.BLOCAGES_MECANIQUES=CL1 ET CL2 et cl3;
tab1.TEMPS_CALCULES=PROG 0. t0 PAS t0 (25*t0);
PASAPAS TAB1;
```

Dans le terminal, on demande de voir les valeurs de chaque pas de calcul:

```
ev1=@global tab1 evol1 cl3 fy;
dess ev1;
list tab1;
```

1.1 Première approche

On cherche ensuite à connaître le déplacement à chaque pas (25 en tout), toujours dans le terminal:

```
list tab1.deplacements;
```

Et ensuite on trace la déformation du béton au niveau du pas 25:

```
def25=defo tab1.deplacements.25 surfbet;
```

Puis les contraintes :

```
trac tab1.contraintes.25 mod2 def25;
```

Et les variables internes:

```
trac tab1.variables_internes.25 mod2 def 25;
```

NB: on se servira de ces commandes tout au long du programme pour afficher nos courbes et graphiques.

Pour ce premier essai, on trouve une convergence à l'itération n°18, avec une fissuration en partie basse du béton, pour un déplacement de $3,69 \cdot 10^{-5}$ m.

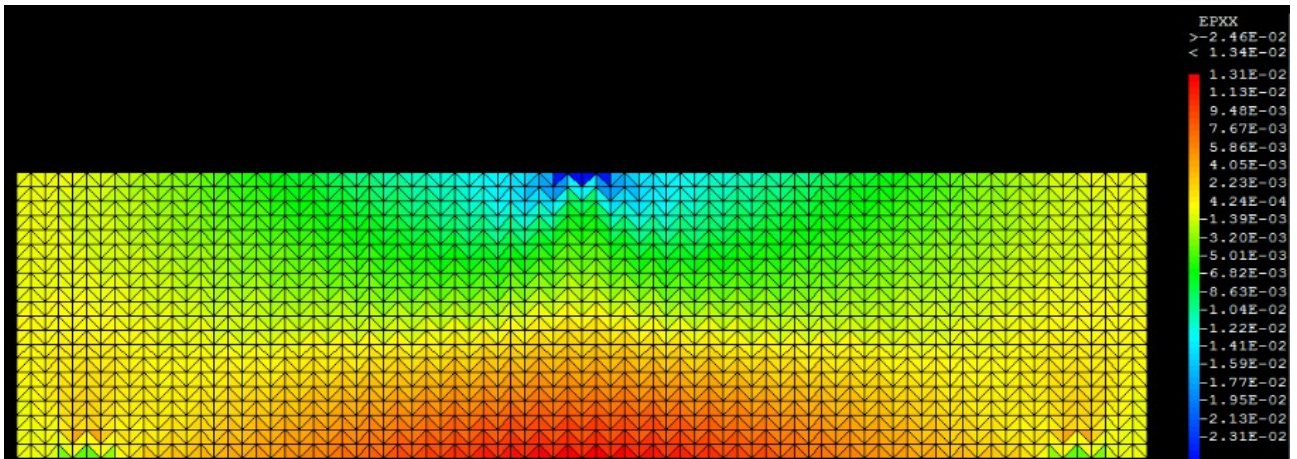


Illustration 6: Etat des contraintes

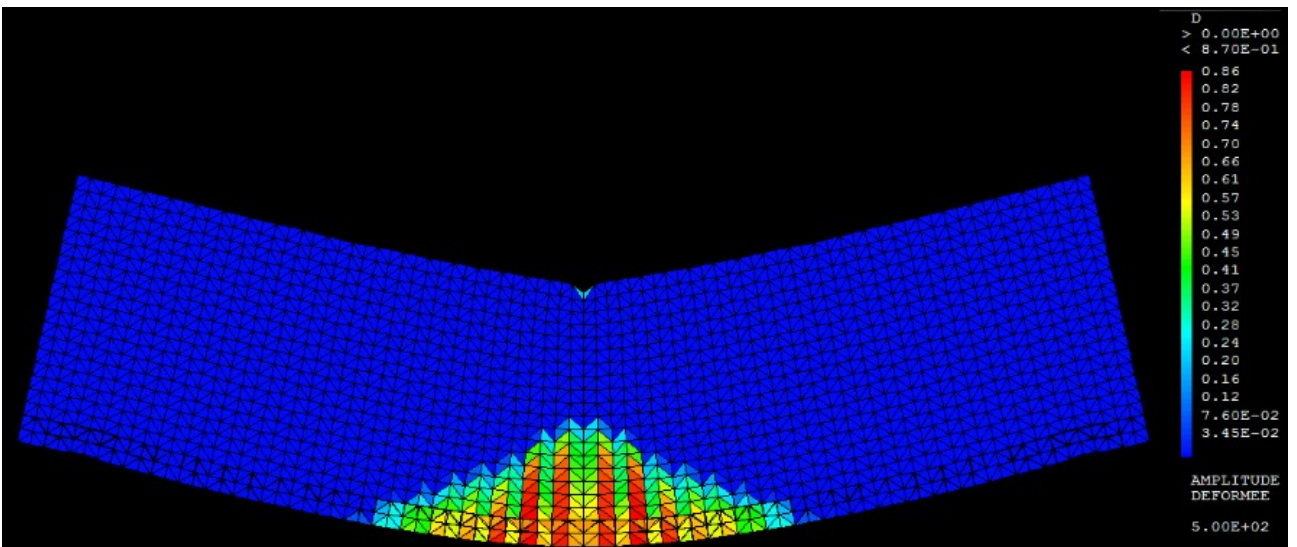


Illustration 7: Ouverture de fissures

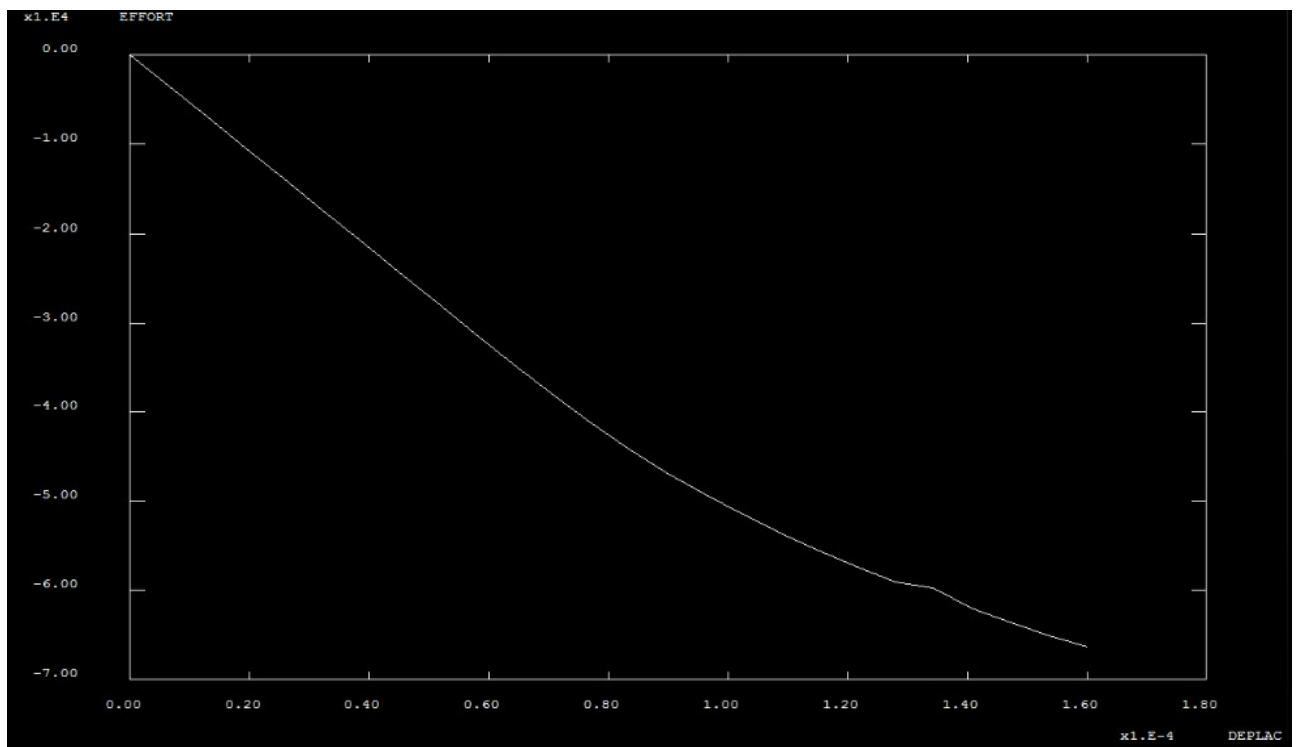


Illustration 8: Diagramme effort-déplacement

On se rend compte sur le graphique des efforts en fonction du déplacement que la limite élastique ne semble pas avoir été atteinte, malgré des ouverture de fissure ponctuelles.

1.2 Deuxième approche

Nous décidons donc de refaire ce calcul avec 100 itérations, pour voir plus loin.

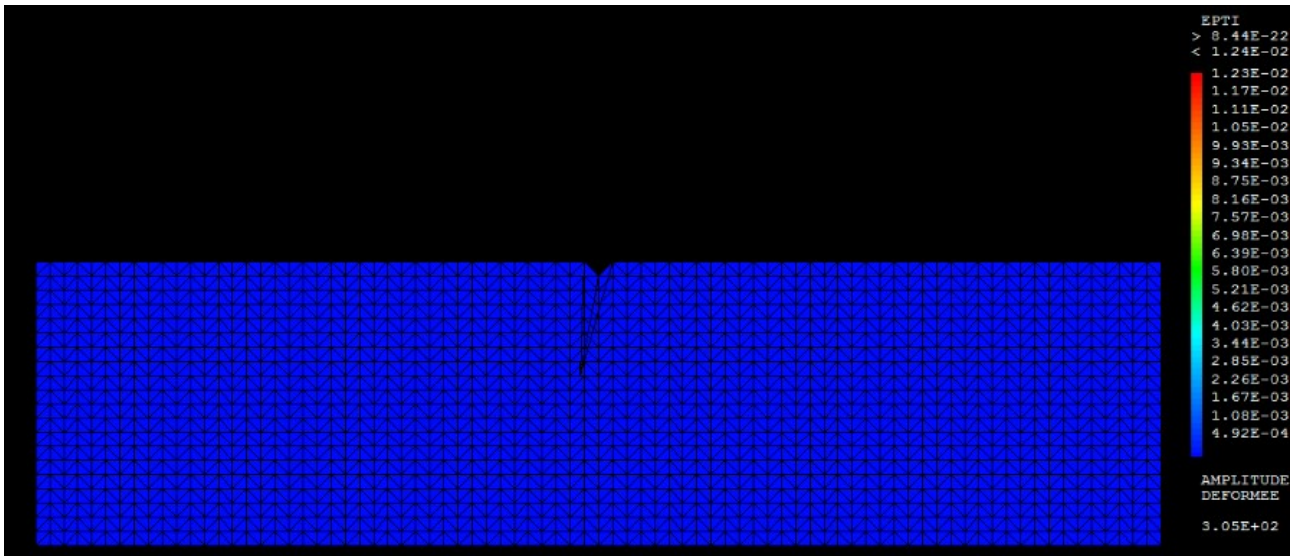


Illustration 9: Ouverture de fissures

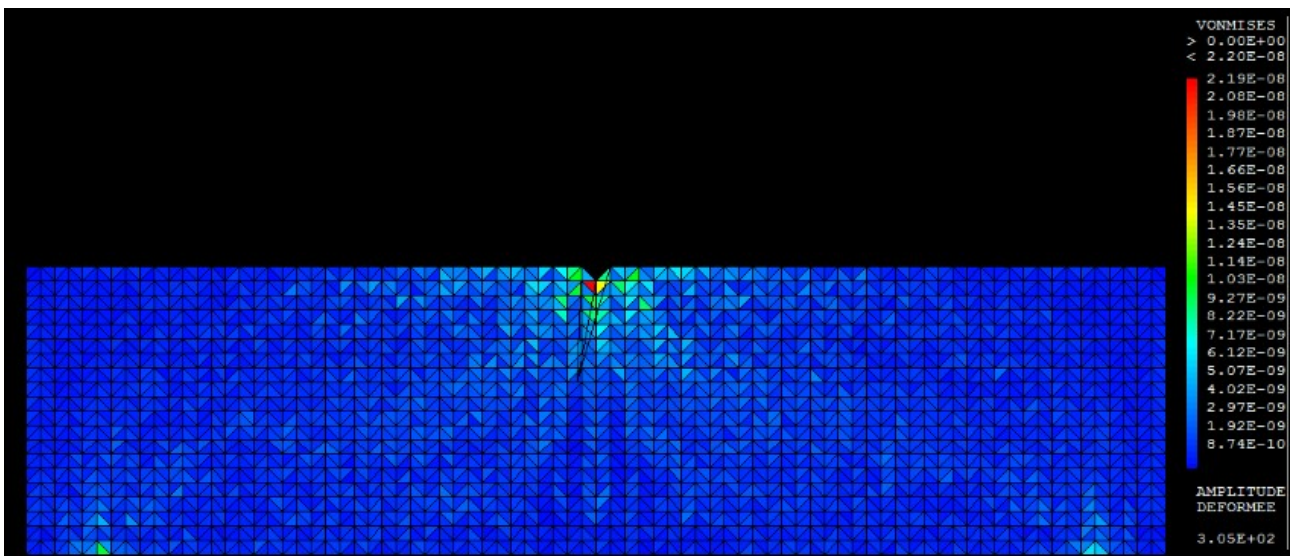


Illustration 10: Critère de Von Mises

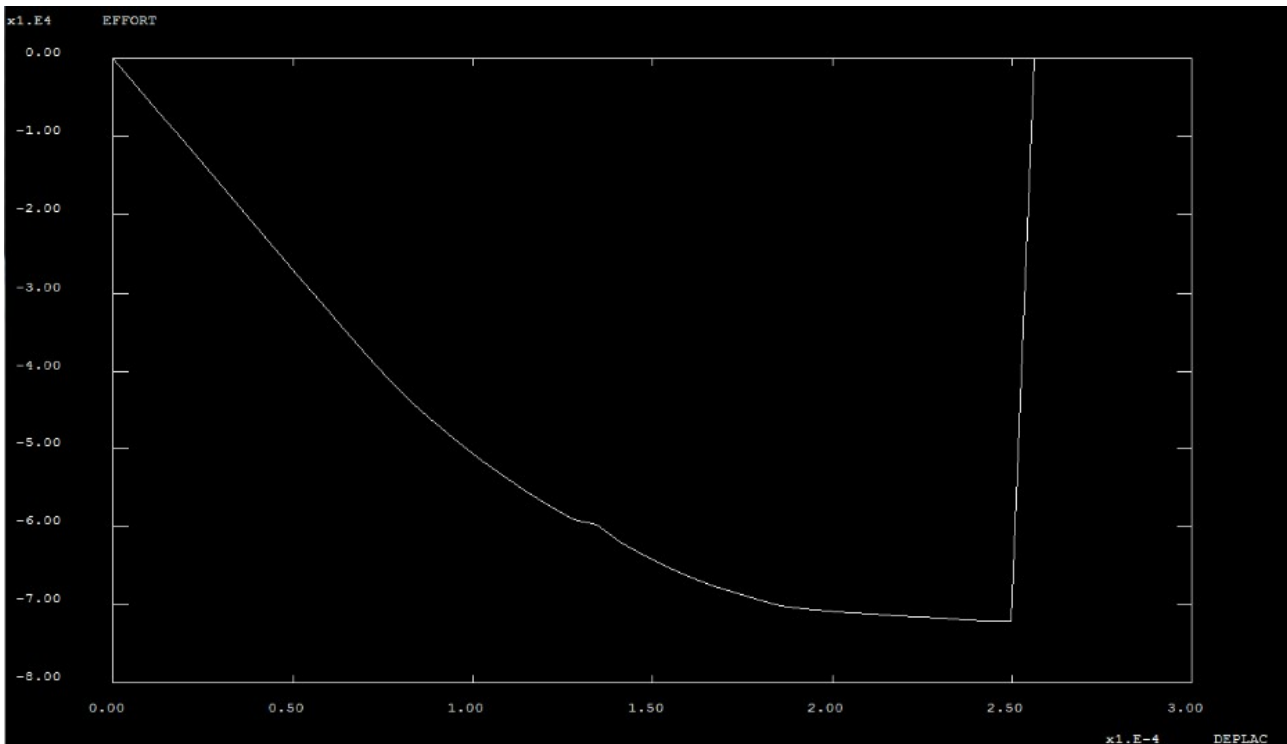


Illustration 11: Graphique effort-déplacement

Lorsque nous allons plus loin que la précédente approche, nous nous rendons compte que le béton a un comportement élastique jusqu'à la rupture complète de l'éprouvette au point d'application de la force, et il apparaît des fissures au droit des appuis. Cette observation est due au fait que nous avons appliqué une force ponctuelle sur notre poutre en béton, or dans la réalité ce type de force parfaitement ponctuelle ne peut pas exister, il y a toujours des contraintes s'appliquant aux abords du point d'application de la force.

Nous décidons donc de modéliser la même structure, mais avec des «cales métalliques» entre le point d'application de la force et la poutre, et entre les appuis et la poutre. Ces cales permettent de modéliser l'effet de propagation des efforts autour du point d'application de la charge et des appuis.

1.3 Modélisation des cales

Pour s'assurer de la bonne position et du fonctionnement du programme avec les cales, nous les avons d'abord insérées dans la feuille de calcul linéaire. Nous modélisons donc une nouvelle droite appelée D8, qui est la translation par les deux vecteurs 1 et 2 créés du vecteur D4 (Cf définition du contour). On rappelle que le VEC1 est la translation de la première ligne pour la ligne d'armature et VEC 2 la translation de la ligne d'armatures pour l'arrête supérieure de la poutre. La surface 3 est alors créée pour représenter les 3 plaques en acier (D2, D8 et D6).

```
*Modélisation des cales
surfbet=surf1 et surf2 coul bleu;
tracer(barr1 et surfbet);
D8=D4 PLUS VEC1 PLUS VEC2;
ELIM D8 SURFBET;
```

PF=D8 POINT PROCH (P2 PLUS VEC1 PLUS VEC2);

SURF3=D2 ET D8 ET D6;

On crée alors un nouveau modèle (Mod3) avec les caractéristiques des plaques en acier.

**caractéristiques des cales en acier*

Mod3=modele surf3 mecanique elastique plastique parfait coq2;

mat3=mate mod3 youn 2.1e11 nu 0.20 SIGY SIGE EPAI eppl;

rig3=rigi mod3 mat3;

Dans le cas du calcul linéaire, nous obtenons alors un graphique de l'état des contraintes quelque peu différent: une zone en compression moindre au niveau de l'application de la charge. La zone de traction en partie basse des aciers est quant à elle légèrement plus étendue.

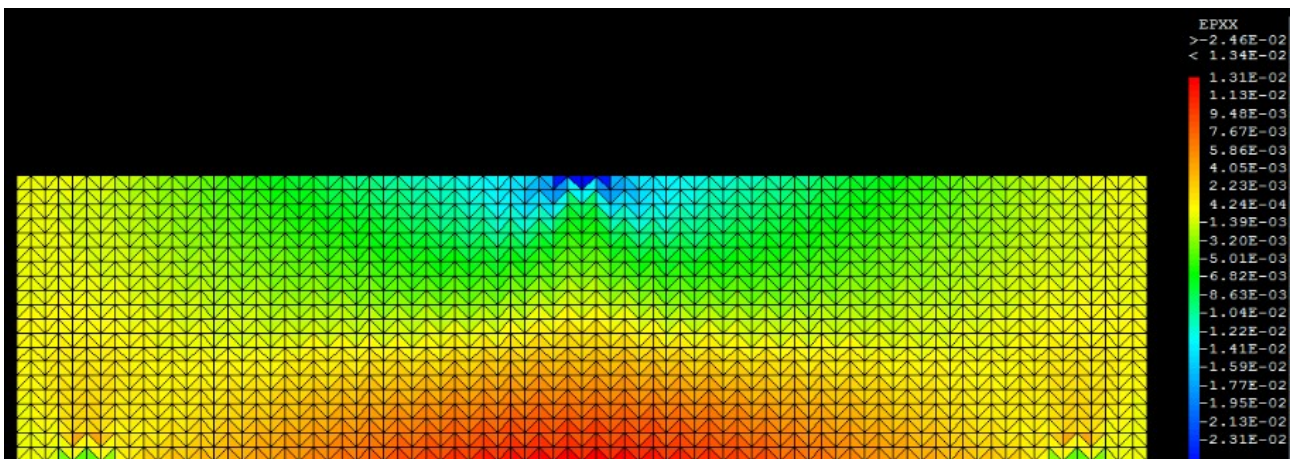


Illustration 12: État des contraintes avant l'insertion des cales

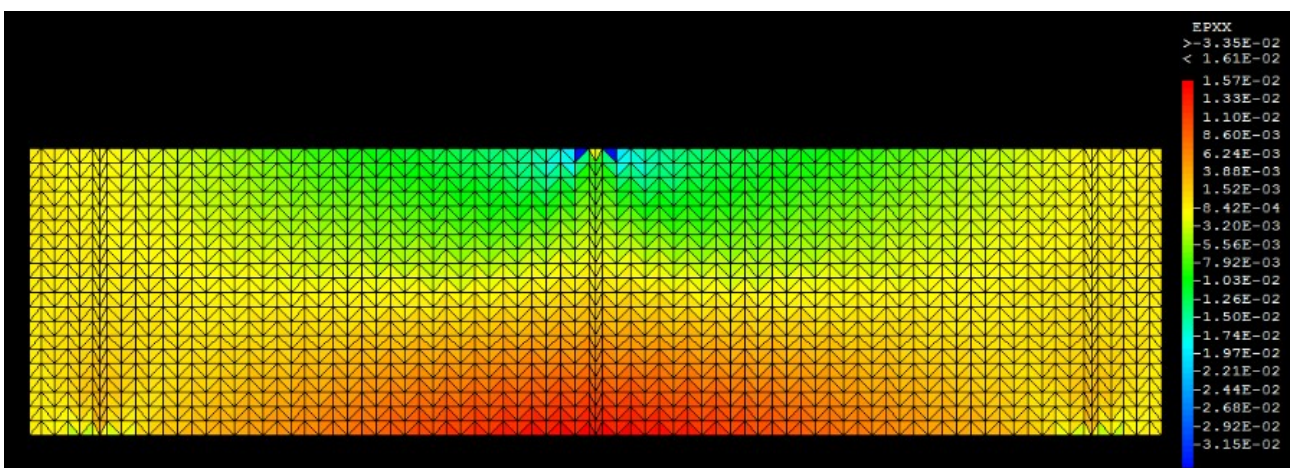


Illustration 13: État des contraintes avec les cales

La déformation de notre poutre est dorénavant plus proche de la réalité, et l'on peut observer les cales sur le schéma de déformation:

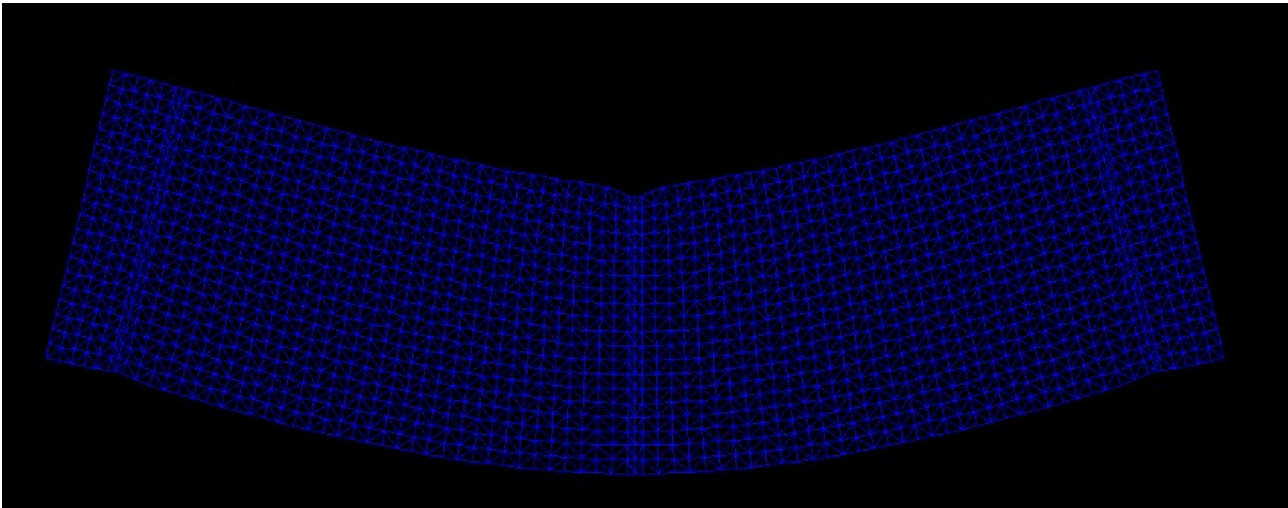


Illustration 14: Déformation de la poutre avec les cales

Cependant, la flèche a diminué ($6,39 \cdot 10^{-5}$ m au premier calcul) avec l'ajout des cales, ce qui nous semble justifié par la diffusion de l'effort par la cale:

```
* Calcul élastique
* modtot=mod1 et mod2 et mod3;
* mattot=mat1 et mat2 et mat3;
* RITOT=rigl et rig2 et rig3 et c11 et c12 et c13;
* DEP1=RESOU RITOT chp0;
Encombrement de la matrice : 161105 Facteur d'encombrement : 2.9472
*
* DEF1=defo DEP1 surfbet;
* tracer DEF1;
* eps1=epsi dep1 mod2;
* max1=maxi eps1 avec (mots epxx);
* list max1;
RUEL valant: 1.60683E-02
* trac eps1 mod1;
* delta1=cktr0/max1*1.e-2;
* message ' la limite elastique est atteinte pour une fleche de '
*          delta1 ' m';
la limite elastique est atteinte pour une fleche de 5.33436E-05 m
*
*
*
FIN DE FICHIER SUR L'UNITE 3
LES DONNEES SONT MAINTENANT LUES SUR LE CLAVIER
```

Illustration 15: Valeur de la flèche avec les cales

Puis, dans le calcul non linéaire:

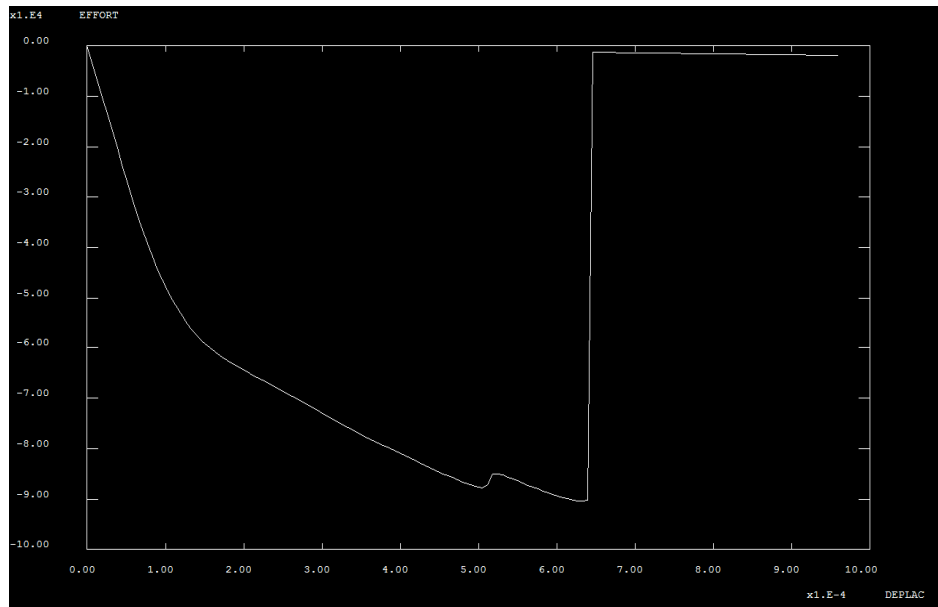


Illustration 16: Courbe Effort Déplacement (itération 150)

On peut ici voir, avec cette courbe effort déplacement que l'ajout des cales en acier nous permet d'aller jusqu'au bout du modèle, c'est à dire jusqu'à la fissuration complète et la rupture de l'éprouvette. On voit ici qu'elle se produit vers 64 kN. Nous regarderons par la suite si les résultats sont cohérents avec le calcul béton armé classique et les expériences en laboratoires.

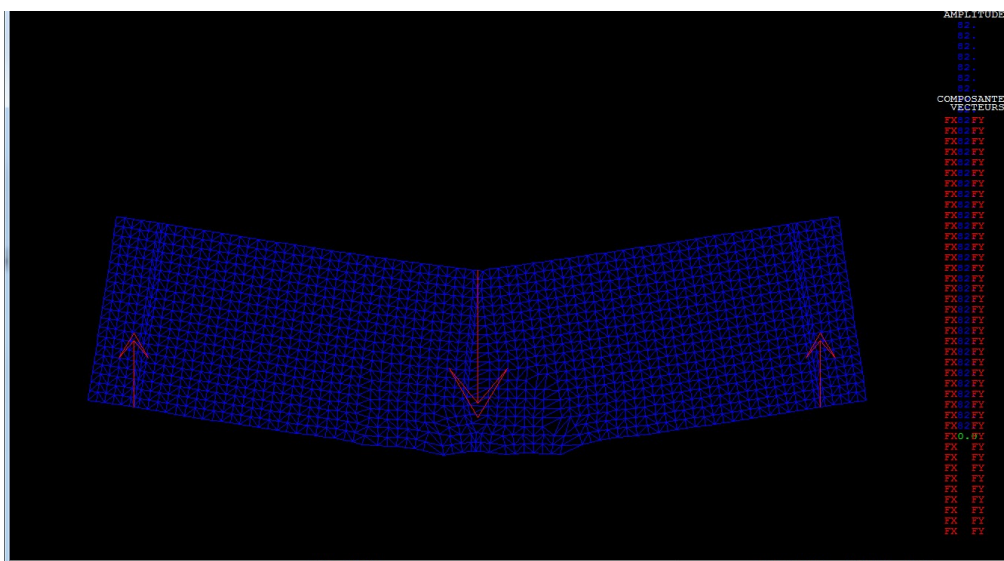
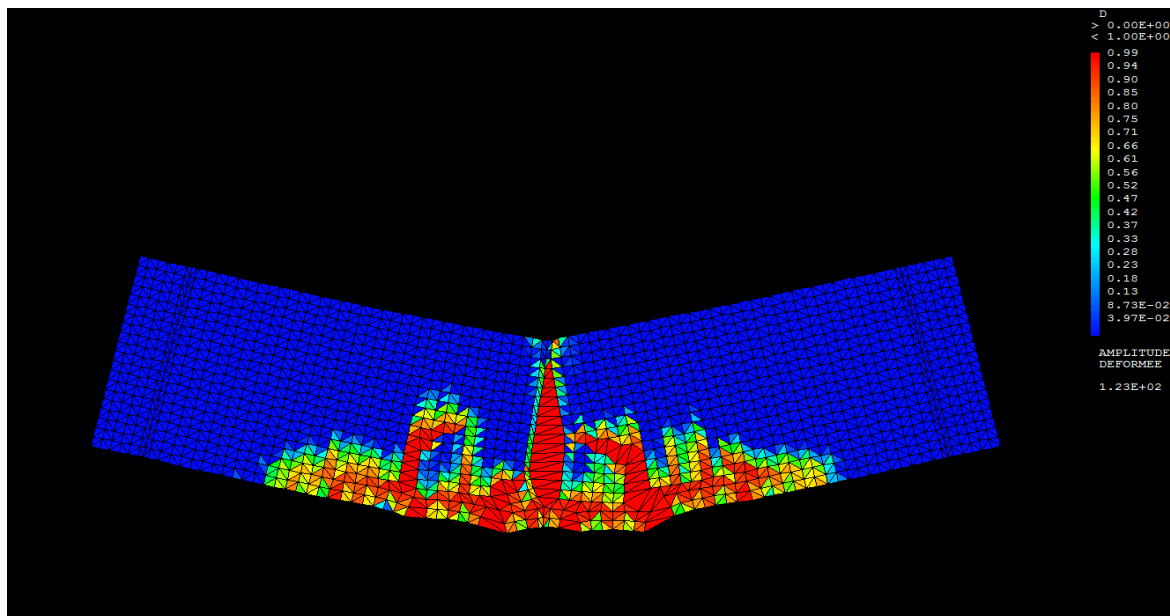
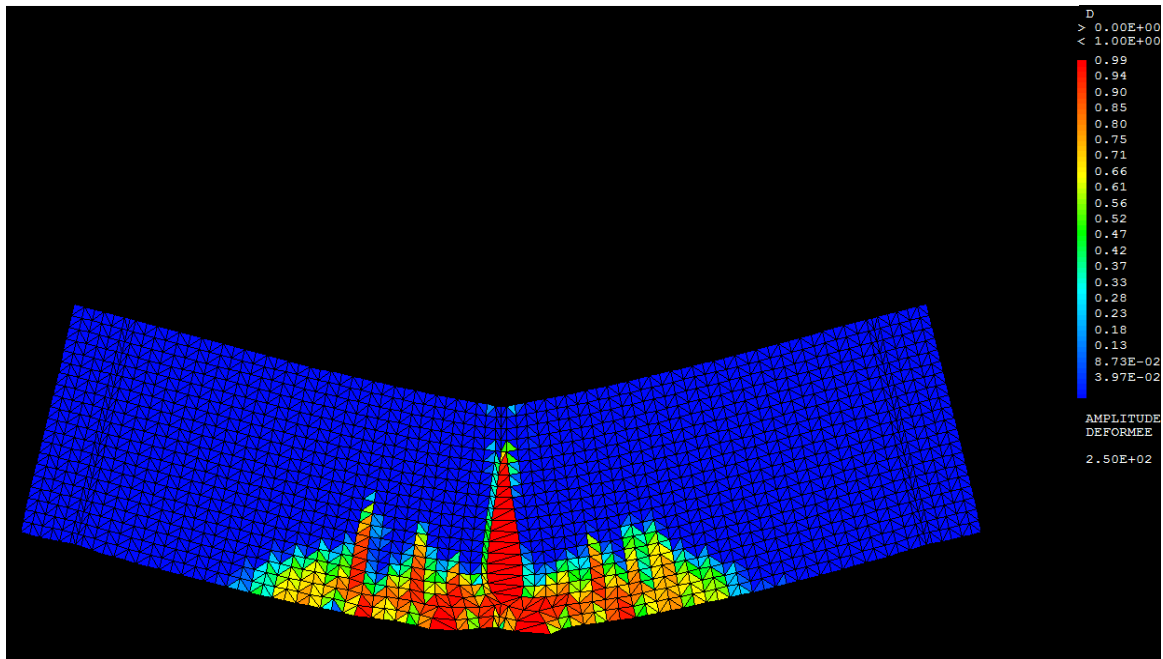


Illustration 17: Déformation progressive de la poutre

Avec l'opérateur @cartoon, on peut modéliser la déformation progressive de la poutre jusqu'à la rupture:

@cartoon tab1 surfbet (cl1 et cl2 e cl3)

On peut alors visualiser l'endommagement de la poutre aux différents pas:



On peut alors visualiser les fissures pour n'importe quel pas de calcul.

On voit clairement la fissure principale à mi-travée et les fissures secondaires de part et d'autre du centre de la poutre en rouge. On peut également noter la non symétrie du modèle. Cela paraît logique puisque le béton est un matériau hétérogène. Nous allons d'ailleurs intégrer ce paramètre pour la suite du calcul.

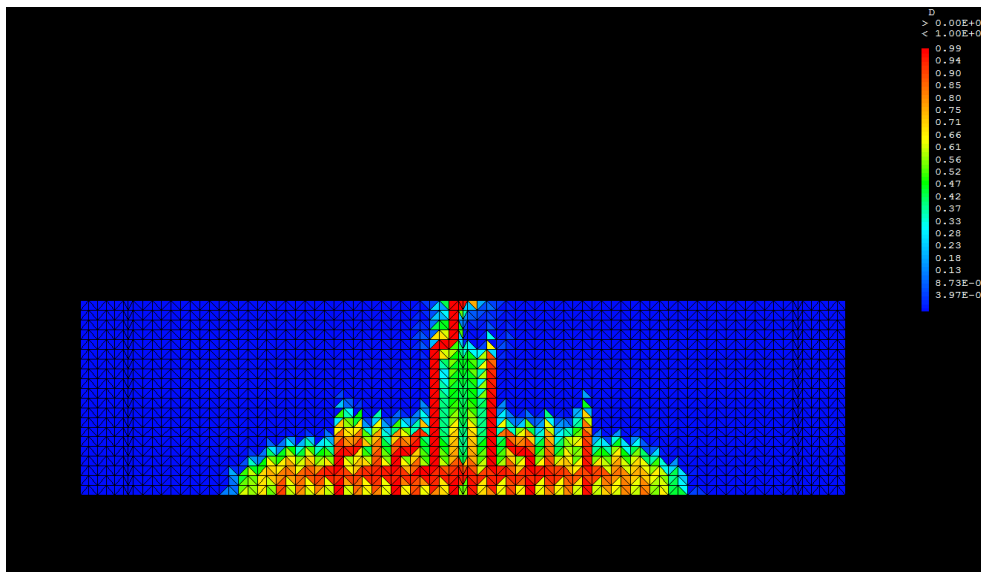


Illustration 20: Visualisation des fissures (pas n°100)

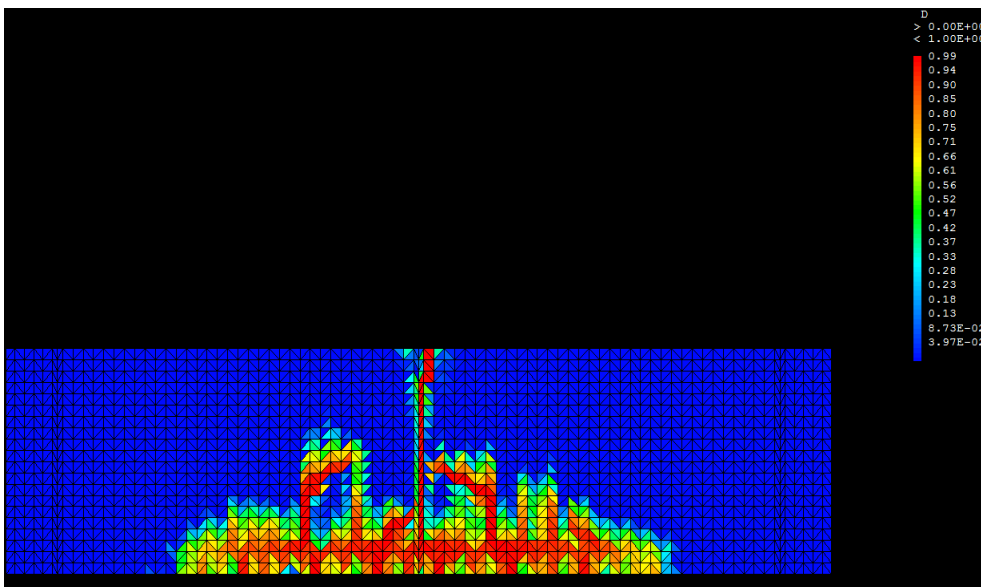


Illustration 21: Visualisation des fissures (pas n°150)

On peut voir au pas de calcul n°150 que la poutre est rompue de part en part.

IV - Intégration dans le calcul de l'hétérogénéité du matériau

béton

Pour intégrer ce facteur, on génère un champ scalaire aléatoire gaussien stationnaire par la méthode des bandes tournantes.

En effet, lors du TP béton, on ne trouve jamais les mêmes résultats pour une même manipulation (avec la presse). Ce opérateur ALEA permet de prendre en compte le caractère aléatoire de la manipulation. Ce caractère aléatoire provient du fait que le matériau béton ne soit pas un matériau homogène. Ici, on a donc appliqué ce mode aléatoire au module d'Young. Cela prend alors en compte l'hétérogénéité du matériau béton et on se rapproche ainsi encore plus de la réalité.

Pour résumé, le module d'Young du béton n'est pas constant en tout point d'une poutre. Ainsi, grâce à ALEA, on prend en compte ce paramètre.

On lance le champ aléatoire de la sorte:

**caractéristiques du béton*

$YG=35.E9;$

$SG1=YG/10.;$

$L1=0.1;$

mod2=modele surfbet mecanique elastique endommagement mazars;

$CH1=ALEA \text{ MOD2 'BANDES_TOURNANTES' EXPO 'SIGMA' SG1}$

$'MOYENNE' YG 'LAMBDA' L1;$

Explications:

- Mod2= modèle béton
- Bandes tournantes = méthode utilisée
- Expo= Loi de covariance exponentielle
- SG1= Ecart type du champ à engendrer. Ici on a pris la valeur moyenne du module young sur 10
- YG= valeur moyenne du champ aléatoire pris en compte, ici 35.E9
- L1= longueur de corrélation, ici 0,1

Ainsi, on trouve le modèle de variation ci-dessous:

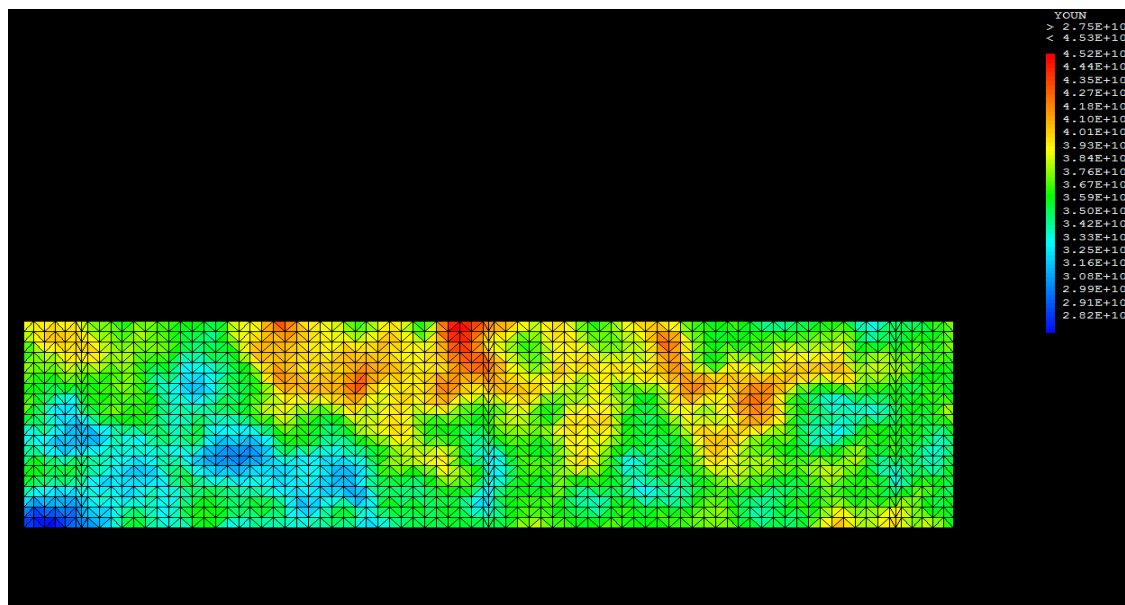


Illustration 22: Variation du module d'Young du béton

On voit donc que le module d'Young varie entre 28,2.E9 et 45,2.E9. Cette variation n'est pas du tout symétrique, ce qui est parfaitement logique.

On peut répéter ce modèle ALEA plusieurs fois pour mesurer l'écart entre les résultats de chaque calcul.

Par exemple, en lançant deux fois l'opérateur ALEA, on trouve une répartition différente comme le montre le modèle de variation ci-dessous:

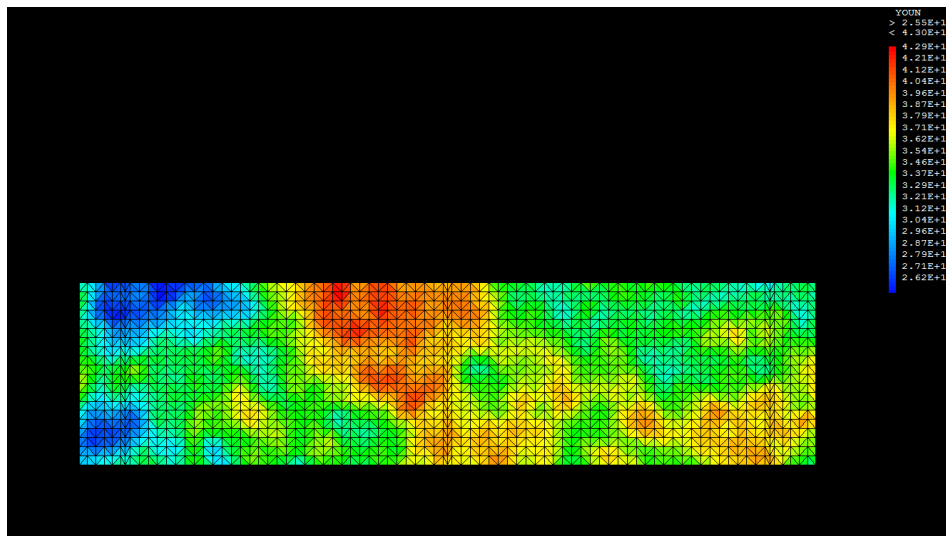


Illustration 23: Variation du module d'Young du béton

Il n'aurait été d'aucun intérêt d'effectuer la même opération sur le modèle acier car en effet, le module d'Young est supposé constant le long d'une barre étant donné le caractère homogène du matériau.

V – Comparaison des résultats avec les résultats des expériences en laboratoire

Le TP béton que nous avons modélisé avec le logiciel CAST3M est un TP effectué par les 3èmes années. Il nous a donc paru intéressant de comparer nos résultats avec les résultats des expériences en laboratoire.

Sur 6 essais différents, les résultats sont les suivants:

Essai n°	Charge Max (kN)
1	66,72
2	59,11
3	70,5
4	65,99
5	72
6	64,34

On voit donc que notre résultat CAST3M se rapproche fortement des résultats expérimentaux sur éprouvettes normalisées ce qui nous rassure sur la pertinence de notre modélisation et la justesse de notre programme.

V – Conséquence du positionnement des armatures

Pour analyser les conséquences de l'épaisseur d'enrobage notre éprouvette en béton armé, il suffit de faire varier ce paramètre et d'étudier les résultats obtenus. On connaît l'importance d'un enrobage suffisant notamment pour protéger les armatures de la corrosion et une résistance au feu convenable. Mais nous allons analyser ici son intérêt d'un point de vue 'matériau'. L'éprouvette est fabriquée avec un enrobage de 2 cm. Nous allons essayer d'analyser ici l'effet du positionnement des armatures (et donc de l'enrobage) sur la fissuration de l'éprouvette. On va ici comparer un enrobage de 1 cm, 2 cm, 5 cm et 10 cm.

Voir tableau comparatif page suivante

Toutes les données du tableau sont prises au pas de calcul n°100.

Ce tableau comparatif nous permet de tirer plusieurs conclusions:

- au pas de calcul n°100, seule l'éprouvette avec 1 cm d'enrobage est parvenue à la rupture (au niveau du béton comprimé). Cela souligne donc parfaitement l'importance d'un enrobage suffisant pour la résistance de l'éprouvette de béton armé. De plus, en s'éloignant du problème, un enrobage insuffisant ne permet pas une protection efficace des armatures contre la corrosion et les place plus près des agressions extérieures (chlorures, environnement extérieur).
- Pour 2 cm d'enrobage, tous les résultats ont été commentés plus haut. Le matériau acier, très résistant en traction permet de palier aux propriétés du béton qui est lui peu résistant à la traction. Les armatures permettent alors de limiter les fissurations du béton tendu.
- Pour 5 cm d'enrobage, on se rend compte que la rupture a lieu pour une charge plus grande (70 kN), mais de très grosses fissures apparaissent au niveau de la sous face de l'éprouvette (béton tendu). On voit également apparaître des fissures transversales qui sont peut être dues à un enrobage trop important mais aussi au fait que nous n'avons pas modélisé les cadres censés reprendre l'effort tranchant.
- Pour 10 cm d'enrobage, on peut voir que la rupture de l'éprouvette survient pour une charge beaucoup plus importante (85 kN) mais la poutre est quasiment fendu dans sa totalité. Les armatures placées au milieu de l'épaisseur de la poutre empêchent cette rupture totale mais le béton tendu est complètement fendu car moins résistant en traction que l'acier qui est placé trop haut pour éviter cette fissuration.

Cette comparaison d'épaisseur d'enrobage nous permet de voir que l'enrobage de deux cm est le plus judicieux vis-à-vis de la limitation des fissures du béton tendu et de la protection des armatures de la corrosion.

Tableau comparatif épaisseur d'enrobage

Enrobage	Courbe effort-déplacement	Endommagement
1 cm		
2 cm		
5 cm		
10 cm		

VI – CONCLUSION

Lors de ce module d'initiation au logiciel CAST3M, nous avons pu appliquer la méthode des éléments finis sur un TP béton que nous avons fait en 3ème année. Tout au long de l'écriture de ce programme, nous avons rencontré de nombreuses difficultés. En effet, l'initiation à un tel logiciel est un peu laborieuse mais le site internet de CAST3M et l'aide de M Laborderie nous ont permis de résoudre nos problèmes et nos interrogations.

Nous avons donc appris à utiliser le langage Gibiane qui permet de communiquer avec le programme. Cette syntaxe, basée sur l'utilisation de directives, d'opérateurs et de procédures n'ont pas toujours été facile à maîtriser. Grâce à cet exercice, nous avons pu choisir une modélisation et des hypothèses simplificatrices (comme la modélisation des armatures ou des cales en acier) pour se rapprocher du modèle réel et avoir des résultats exploitables.

Nous nous sommes rendus compte qu'avec un modèle 2D, nous obtenons des résultats très proches de la réalité. Cependant, en ne considérant que le modèle 2D, le logiciel modélise l'acier comme étant une plaque continue au niveau de la hauteur d'enrobage. Or ce n'est pas le cas puisque dans la réalité, on a un lit d'acier composé de 4HA8.

Pour être encore plus précis, il faudrait alors modéliser le problème en 3D en plaçant correctement les 4HA8 et les cadres transversaux même si, malgré tout, le modèle 2D est satisfaisant.

Nous avons pu enfin nous rendre compte de la puissance d'un tel logiciel et de l'intérêt qu'il peut représenter, notamment dans la recherche.

Programme linéaire:

* 1) Problème 2D

$nha=4;$

$diam1=8.E-3;$

$sect1=nha*pi*(diam1**2)/4;$

$ft=3.E6;$

$GF=100.;$

**caractéristiques plaque acier aux appuis et au point d'application de la force*

$eppl=5.e-3;$

opti dime 2 elem tri3 MODE PLAN CONT;

*

** paramètre du problème*

*

$DENS1=1.E-2;$

$SIGE=500.E6;$

$DENSITE DENS1;$

$EP1=0.2;$

*

**points maitres*

*

densite dens1;

$P0=0. 0.;$

$P1a=4.5e-2 0;$

$P1=5.E-2 0.;$

$P1b=5.5e-2 0;$

$P2a=39.5e-2 0.;$

$P2=40.E-2 0.;$

$P2b=40.5e-2 0.;$

$P3a=74.5e-2 0;$

$P3=75.E-2 0.;$

$P3b=75.5e-2 0;$

$P4=80.E-2 0.;$

TRACER (P0 et P1a et P1 et P1b et P2 et P3a et P3 et P3b et P4);

**construction du contour*

*

$D1=DROI P0 P1A;$

$D2=DROI P1A P1 DROI P1B;$

D3=DROI P1B P2A;
D4=DROI P2A P2 DROI P2B;
D5=DROI P2B P3A;
D6=DROI P3A P3 DROI P3B;
D7=DROIT P3B P4;

LIG1=D1 ET D2 ET D3 ET D4 et D5 et D6 ET D7;
TRACER(LIG1);

**Translation de la première ligne pour la ligne moyenne d'armatures*

N1=1.;
VEC1=0. 2.e-2;

SURF1=LIG1 TRANSLATION VEC1;
barr1=surf1 cote 3 coul rouge;

**Translation de la seconde ligne pour la ligne supérieure de la poutre*

VEC2=0. 18.e-2;
SURF2=BARR1 TRANSLATION VEC2;

surfbet=surf1 et surf2 coul bleu;
tracer(barr1 et surfbet);
D8=D4 PLUS VEC1 PLUS VEC2;
ELIM D8 SURFBET;
PF=D8 POINT PROCH (P2 PLUS VEC1 PLUS VEC2);

SURF3=D2 ET D8 ET D6;

**caractéristiques des plaques en acier*

Mod3=modele surf3 mecanique elastique plastique parfait coq2;
mat3=mate mod3 youn 2.1e11 nu 0.20 SIGY SIGE EPAI eppl;
rig3=rigi mod3 mat3;

**caractéristiques de l'acier (armature 4HA8)*

Mod1=modele barr1 mecanique elastique plastique parfait barre;
mat1=mate mod1 youn 2.1e11 nu 0.20 SIGY SIGE SECT sect1;
rig1=rigi mod1 mat1;

**caractéristiques du béton*

```
mod2=modele surfbet mecanique elastique endommagement mazars;  
mat0=mate mod2 btra 1;  
intg1=intg mat0 mod2 elem;  
chh=intg1**0.5;  
chbtra=chh*ft/Gf;  
cktr0=ft/(35e9);  
mat2=mate mod2 youn 35e9 nu 0.28 btra chbtra atra  
-5 acom 1.4 ktr0 cktr0 bcom 1900 beta 1.06 dim3 ep1;  
rig2=rigi mod2 mat2;
```

** Conditions aux limites*

```
CL1=bloquer P1 uy;  
CL2=bloquer P3 ux uy;  
CL3=bloq PF uy;
```

** On impose un déplacement à mi travée plutôt qu'un effort (explication dans rapport)*

```
chp0=depi cl3 -1.e-2;
```

** définition du chargement*

*

```
PROG1=PROG 0. 100.;  
EVOL1=EVOL MANU PROG1 PROG1;  
CHAR1=CHARGEMENT EVOL1 chp0 DIMP;
```

** Calcul élastique*

```
modtot=mod1 et mod2 et mod3;  
mattot=mat1 et mat2 et mat3;  
RITOT=rig1 et rig2 et rig3 et cl1 et cl2 et cl3;  
DEP1=RESOU RITOT chp0;
```

```
DEF1=defo DEP1 surfbet;  
tracer DEF1;  
eps1=epsi dep1 mod2;  
max1=maxi eps1 avec (mots epxx);  
list max1;  
trac eps1 mod1;  
delta1=cktr0/max1*1.e-2;  
message ' la limite elastique est atteinte pour une fleche de '  
delta1 ' m';
```

Programme non linéaire (PAS A PAS):

* 1) Problème 2D

$nha=4;$

$diam1=8.E-3;$

$sect1=nha*pi*(diam1**2)/4;$

$ft=3.E6;$

$GF=100.;$

**caractéristiques plaque acier aux appuis et au point d'application de la force*

$eppl=5.e-3;$

opti dime 2 elem tri3 MODE PLAN CONT;

*

** paramètre du problème*

*

$DENS1=1.E-2;$

$SIGE=500.E6;$

$DENSITE DENS1;$

$EP1=0.2;$

*

**points maitres*

*

densite dens1;

$P0=0. 0.;$

$P1a=4.5e-2 0;$

$P1=5.E-2 0.;$

$P1b=5.5e-2 0;$

$P2a=39.5e-2 0.;$

$P2=40.E-2 0.;$

$P2b=40.5e-2 0.;$

$P3a=74.5e-2 0;$

$P3=75.E-2 0.;$

$P3b=75.5e-2 0;$

$P4=80.E-2 0.;$

TRACER (P0 et P1a et P1 et P1b et P2 et P3a et P3 et P3b et P4);

**construction du contour*

*

$D1=DROI P0 P1A;$

$D2=DROI P1A P1 DROI P1B;$

D3=DROI P1B P2A;
D4=DROI P2A P2 DROI P2B;
D5=DROI P2B P3A;
D6=DROI P3A P3 DROI P3B;
D7=DROIT P3B P4;

LIG1=D1 ET D2 ET D3 ET D4 et D5 et D6 ET D7;
TRACER(LIG1);

**Translation de la première ligne pour la ligne moyenne d'armatures*

N1=1.;
VEC1=0. 2.e-2;

SURF1=LIG1 TRANSLATION VEC1;
barr1=surf1 cote 3 coul rouge;

**Translation de la seconde ligne pour la ligne supérieure de la poutre*

VEC2=0. 18.e-2;
SURF2=BARR1 TRANSLATION VEC2;

surfbet=surf1 et surf2 coul bleu;
tracer(barr1 et surfbet);
D8=D4 PLUS VEC1 PLUS VEC2;
ELIM D8 SURFBET;
PF=D8 POINT PROCH (P2 PLUS VEC1 PLUS VEC2);

SURF3=D2 ET D8 ET D6;

**caractéristiques des plaques en acier*

Mod3=modele surf3 mecanique elastique plastique parfait coq2;
mat3=mate mod3 youn 2.1e11 nu 0.20 SIGY SIGE EPAI eppl;
rig3=rige mod3 mat3;

**caractéristiques de l'acier (armature 4HA8)*

Mod1=modele barr1 mecanique elastique plastique parfait barre;
mat1=mate mod1 youn 2.1e11 nu 0.20 SIGY SIGE SECT sect1;
rig1=rigi mod1 mat1;

**caractéristiques du béton*

YG=35.E9;
SG1=YG/10.;
L1=0.1;
mod2=modele surfbet mecanique elastique endommagement mazars;
CH1=ALEA MOD2 'BANDES_TOURNANTES' EXPO 'SIGMA' SG1
'MOYENNE' YG 'LAMBDA' L1;

mat0=mate mod2 btra 1;
intg1=intg mat0 mod2 elem;
*chh=intg1**0.5;*
*chbtra=chh*ft/Gf;*
cktr0=ft/(35e9);
mat2=mate mod2 youn CH1 nu 0.28 btra chbtra atra
-5 acom 1.4 ktr0 cktr0 bcom 1900 beta 1.06 dim3 ep1;

trac mat2 mod2;

** Conditions aux limites*

CL1=bloquer P1 uy;
CL2=bloquer P3 ux uy;
CL3=bloq PF uy;

** On impose un déplacement à mi travée plutôt qu'un effort (explication dans rapport)*

chp0=depi cl3 -1.;

** définition du chargement*

PROG1=PROG 0. 100.;
EVOL1=EVOL MANU PROG1 PROG1;
CHAR1=CHARGEMENT EVOL1 chp0 DIMP;

** Calcul élastique*

modtot=mod1 et mod2 et mod3;
mattot=mat1 et mat2 et mat3;

**avec le modele qu'on trouve, on se rend compte de la déformation différente au niveau des appuis. Cependant, on est toujours pas sur d'avoir une réponse proche de la réalité (plus qu'en RDM) puisqu'en réalité, une force ponctuelle n'existe pas. il s'agit d'une charge surfacique, même si elle est petite.*

T0=(6.4e-5/10.);

** Calcul PAS A PAS*

TAB1=TABLE;

TAB1.MODELE=modtot;

TAB1.CARACTERISTIQUES=mattot;

TAB1.CHARGEMENT=char1;

TAB1.BLOCAGES_MECANIQUEES=CL1 ET CL2 et c13;

*tab1.TEMPS_CALCULES=PROG 0. t0 PAS t0 (150*t0);*

PASAPAS TAB1;

ev1=@global tab1 evol1 c13 fy;

dess ev1;