



Modélisation aux éléments finis

Cisaillement de deux briques de terre crue

Azam Marie-Hélène
Antipot Thomas

Sommaire

Essai de cisaillement	4
0. Problématique.....	4
1. Caractéristiques mécaniques du matériau.....	4
1.1 Angle de frottement.....	4
1.2 Autres Données expérimentales :	5
1.3 Etude paramétrique du module d'Young et de la limite élastique.	5
1.3.1 Programme Cast3m.....	6
1.3.2 Analyse des résultats.....	6
2. Modélisation élémentaire de l'essai [GeometrieSimple.dgibi]	7
2.1 Programme Cast3m.....	8
2.2 Analyse des résultats.....	8
3. Modélisation des briques avec les plots :	10
3.1 Programme Cast3m.....	10
3.2 Analyse des résultats.....	10
4. Conclusion	13
Annexe n°1 [Annexe.dgibi].....	14
Annexe n°2 GeometrieSimple.dgibi	16
Annexe n°3 [Terrecrue.dgibi]	20

Essai de cisaillement

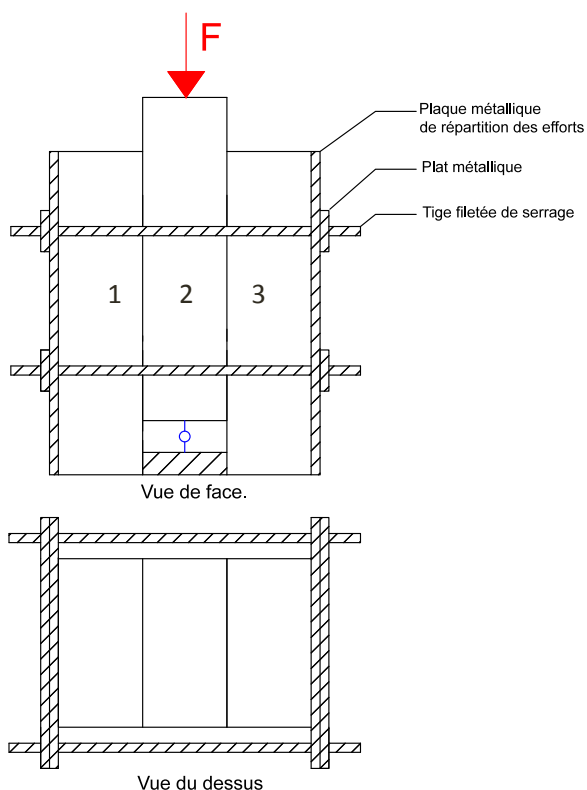


Figure 1 : Schéma de l'essai de cisaillement

0. Problématique

Ce rapport s'insère dans un projet de caractérisation mécanique de brique en terre crue pour le bureau d'étude BETEM. Lors de cette campagne d'essai, il nous a été demandé de caractériser la résistance au cisaillement de deux briques. Au vu des résultats obtenus, nous ne pouvons utiliser la boîte de Casagrande ou la cellule triaxiale pour réaliser un essai de cisaillement. Nous avons donc fait le choix d'utiliser Cast3m dans le but de répondre à ce problème. Nous proposons l'expérience résumée par le schéma ci-contre pour mener un essai de cisaillement direct.

Le principe est de maintenir confinées trois briques grâce à des tiges filetées. Le support (plaque) bloque le déplacement horizontal des briques. On applique ensuite une force verticale F sur la brique intermédiaire pour induire le cisaillement entre les briques 1 et 2 ; et 2 et 3.

Nous avons travaillé sur la modélisation aux éléments finis de cette expérience par le code Cast3M dans le but de déterminer une résistance au cisaillement, fonction de l'effort de confinement.

1. Caractéristiques mécaniques du matériau

1.1 Angle de frottement

Pour modéliser la résistance au cisaillement des briques, nous avons besoin de déterminer l'angle de frottement ϕ (radian) des briques et μ (radian) leur coefficient de frottement. Pour réaliser cet essai, nous mesurons la hauteur à partir de laquelle une brique glisse contre l'autre. Nous avons pris deux surfaces lisses, l'influence des plots n'est donc pas prise en compte.

Essai n°	Mesure (cm)	ϕ (rd)	$\mu = \tan \phi$
1	30,5	0,56	0,63
2	28,0	0,51	0,56
3	31,0	0,58	0,65
4	30,0	0,55	0,62
5	31,2	0,58	0,65
6	29,5	0,54	0,61
7	30,2	0,56	0,63
8	30,0	0,55	0,62

	Moyenne	Ecart Type
ϕ (rd)	0,55	0,02
μ (rd)	0,62	0,03

1.2 Autres Données expérimentales :

Le tableau ci-dessous regroupe tous les résultats des essais menés et nécessaires à la modélisation.

	Moyenne	Ecart-type
Contrainte à la rupture flexion (MPa)	1,65	0,16
Contrainte à la rupture compression (MPa)	3,83	0,47
Coefficient de Poisson chargement	0,15	0,03
Coefficient de Poisson déchargement	0,16	0,03
Module d'Young chargement (GPa)	1,493	0,12
Module d'Young déchargement (GPa)	1,394	0,10
Coefficient de frottement μ (rd)	0,62	0,03

Pour visualiser la loi de comportement du matériau, nous avons tracé les courbes de contrainte déformation, de chaque essai de compression :

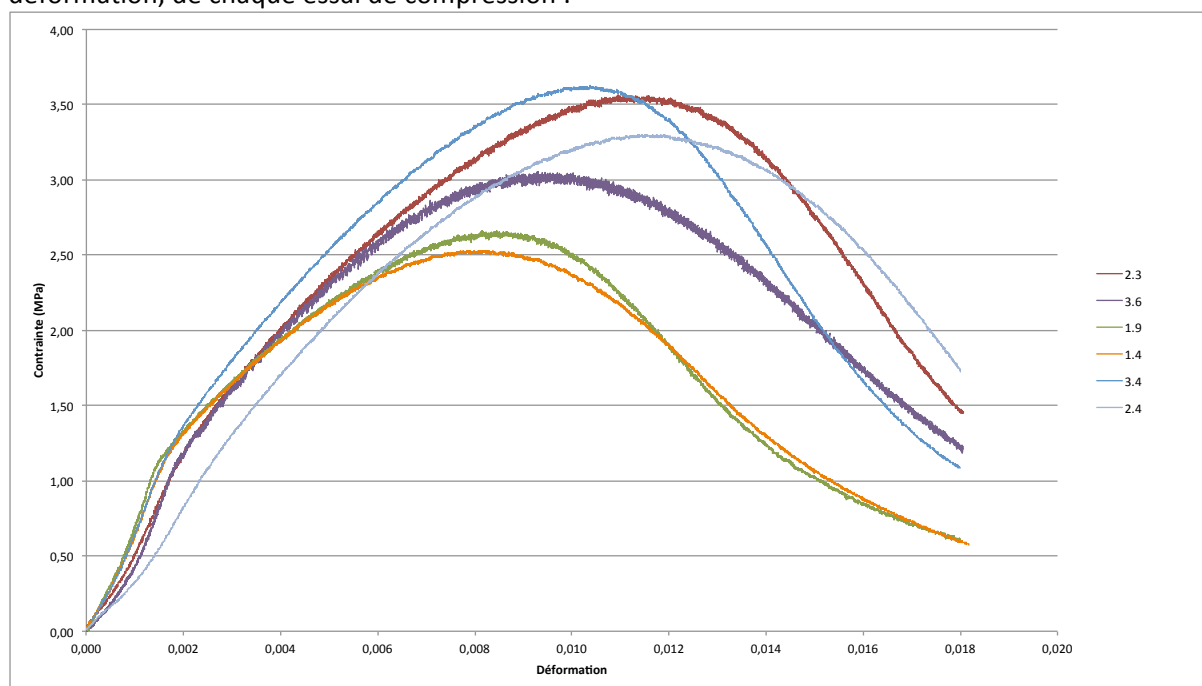
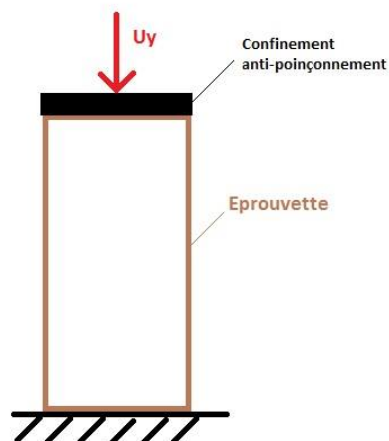


Figure 2 : Courbe contrainte-déformation, essais de compression.

1.3 Etude paramétrique du module d'Young et de la limite élastique.

Au vu des caractéristiques mécaniques du matériau disponibles, nous avons choisi d'appliquer une loi de comportement simple : modèle élastique plastique parfait. D'après l'allure des courbes expérimentales, nous aurions pu utiliser un autre modèle comme celui d'endommagement, ou d'écroutissement. Cependant des données supplémentaires sont nécessaires.

Dans le but de faire coïncider la loi de comportement expérimentale avec celle d'une loi élastique plastique parfaite, nous avons modélisé l'essai de compression réalisé sur éprouvette cylindrique.



1.3.1 Programme Cast3m

L'essai est reproduit en 2D tel que sur le schéma. On a ainsi modélisé une éprouvette de 50x100 mm avec un déplacement vertical en tête de l'éprouvette. Pour que celui-ci soit uniformément réparti nous avons surmonté la brique d'un élément coque en acier indéformable.

En annexe se trouve le programme que nous avons écrit avec les commentaires d'explication [GeometrieSimple.dgibi].

Figure 3: Schéma de la modélisation

1.3.2 Analyse des résultats

Lors de la première modélisation nous avons utilisé comme première approximation les résultats expérimentaux :

Résistance élastique $\sigma_y = 1,65 \text{ MPa}$

Module d'Young $E = 1,44 \text{ GPa}$

Cast3M calcule pas à pas la distribution des contraintes, pour un déplacement allant de 0 à 1,50 mm avec un pas de 0,01 mm. On peut comparer les courbes expérimentales avec la courbe issue de la modélisation aux éléments finis (Figure 4).

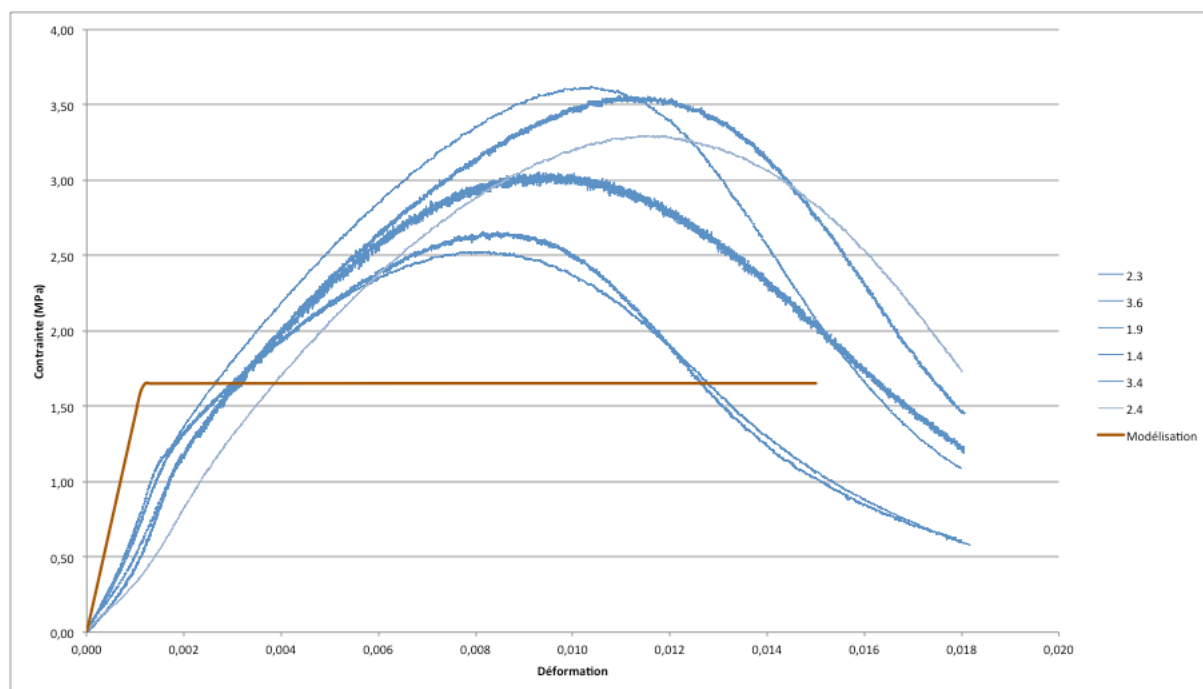


Figure 4 : Comparaison entre les courbes expérimentales (bleu) et la modélisation (rouge) avec $\sigma_y = 1,65 \text{ MPa}$ et $E = 1,44 \text{ GPa}$. $E = 1,44 \text{ GPa}$

On observe qu'elles ne se superposent pas. Nous avons donc fait varier les paramètres jusqu'à obtenir un modèle semblable. Pour la suite de l'étude nous utilisons les paramètres suivants :

Résistance élastique $\sigma_y = 3 \text{ MPa}$

Module d'Young $E = 0,5 \text{ GPa}$

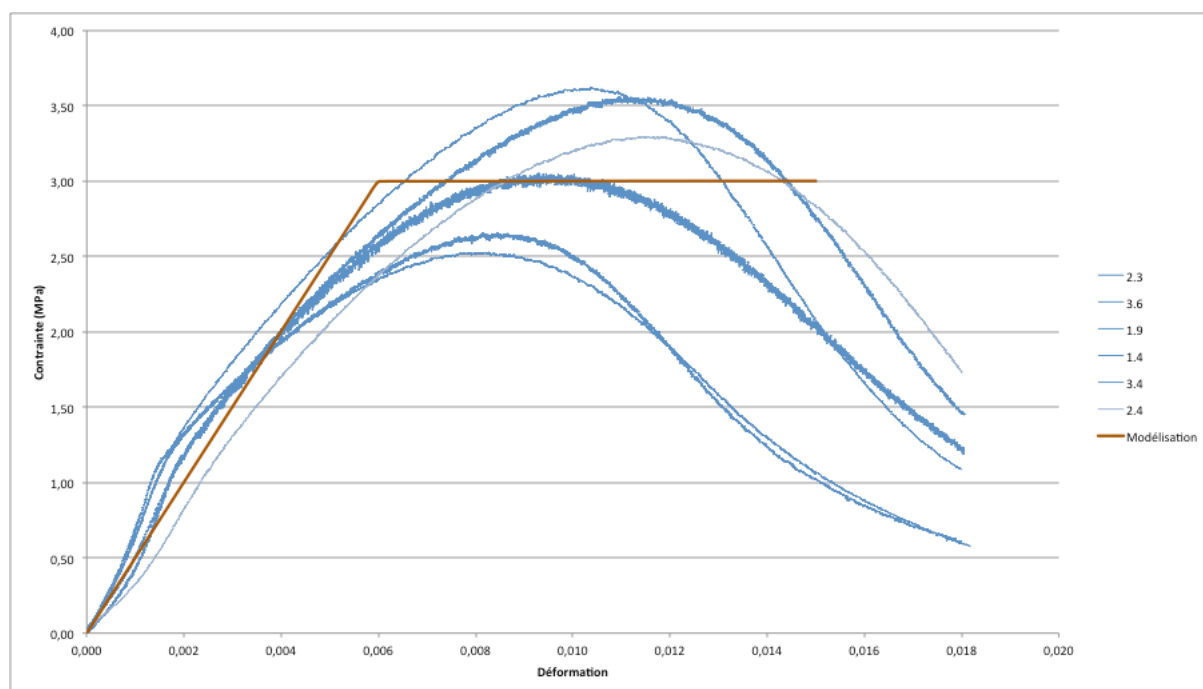


Figure 5 : Comparaison entre les courbes expérimentales (bleu) et la modélisation (rouge) avec $\sigma_y = 3 \text{ MPa}$ et $E = 0,5 \text{ GPa}$
 $E = 0,5 \text{ GPa}$

2. Modélisation élémentaire de l'essai [GeometrieSimple.dgibi]

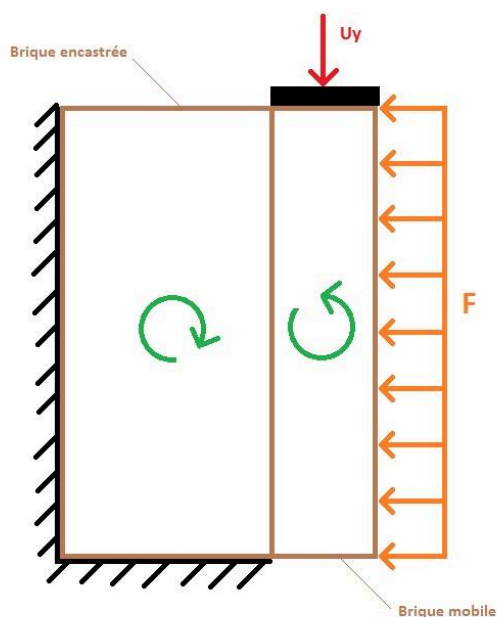


Figure 6: Schéma de la modélisation élémentaire

Nous avons commencé par modéliser l'essai de manière très simple avec deux briques rectangulaires (cf. schéma ci-contre). La brique de gauche mesure $35,3 \times 9,2 \text{ (cm)}$ et celle de droite $35,3 \times 4,6 \text{ (cm)}$. Le maillage est composé d'éléments triangulaires avec une densité de $0,005$. La brique de gauche est encadrée suivant \vec{x} et suivant \vec{y} . Nous avons imposé un déplacement U_y de 5 mm et une force de confinement $\sigma_N = 1 \text{ MPa}$.

Le programme nous permet de visualiser la répartition des contraintes normales et tangentielles dans les briques pour chaque pas de calcul.

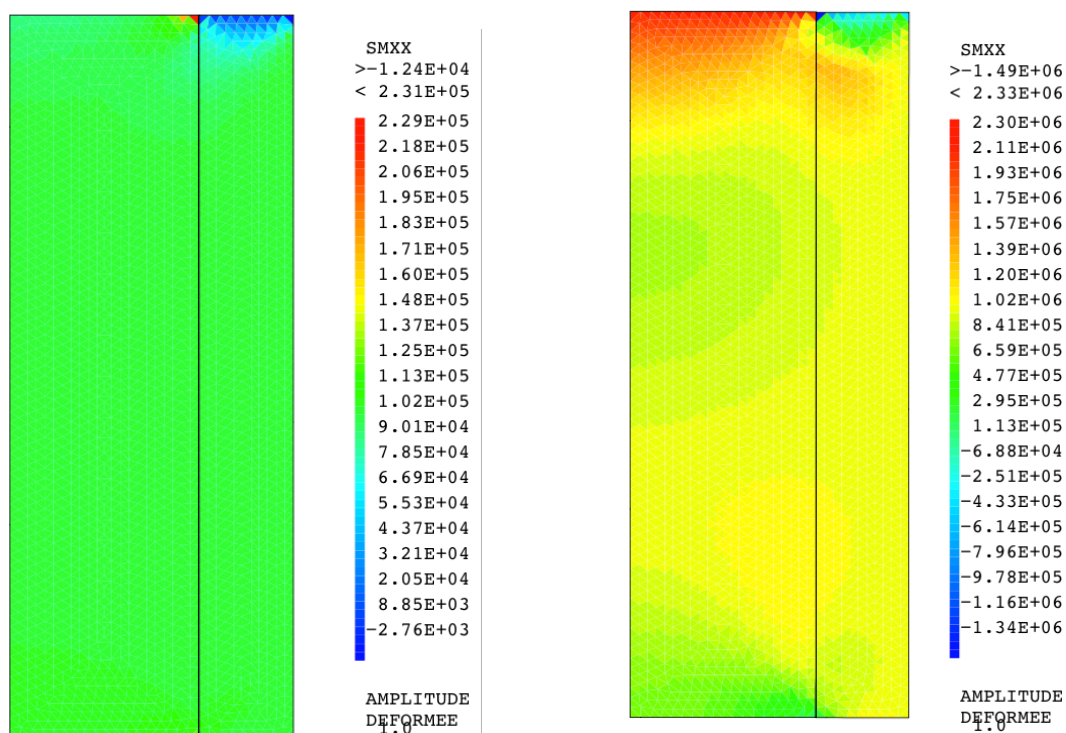
2.1 Programme Cast3m

En annexe se trouve le programme que nous avons écrit avec les commentaires d'explication [GeometrieSimple.dgibi].

Plutôt que de modéliser trois briques, nous avons réalisé seulement la moitié de l'essai. Nous avons commencé par modéliser la géométrie des deux briques, puis les conditions de confinement comme décrites précédemment. Pour éviter le poinçonnement du au déplacement imposé sur la brique, nous avons placé un élément coque en acier indéformable. Nous avons ensuite défini le contact frottement entre les deux briques avec un modèle Mohr-Coulomb. Le calcul est réalisé par itération.

2.2 Analyse des résultats

Répartition des contraintes normales σ_{xx} et déformée non amplifiée des briques au début (gauche) et à la fin (droite) de l'essai.



On peut voir qu'au début de l'essai, la répartition des contraintes de compression est uniforme, sauf en haut de la deuxième brique où la coque impose une rigidité supplémentaire. Lorsqu'on applique le déplacement en haut de la brique n°2, la répartition des contraintes normales et tangentielles évolue.

Répartition des contraintes tangentielles σ_{xy} et déformée non amplifiée des briques au début et à la fin de l'essai.

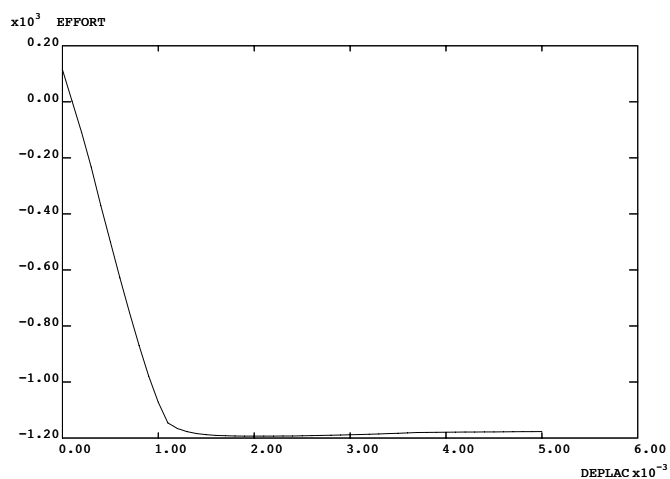
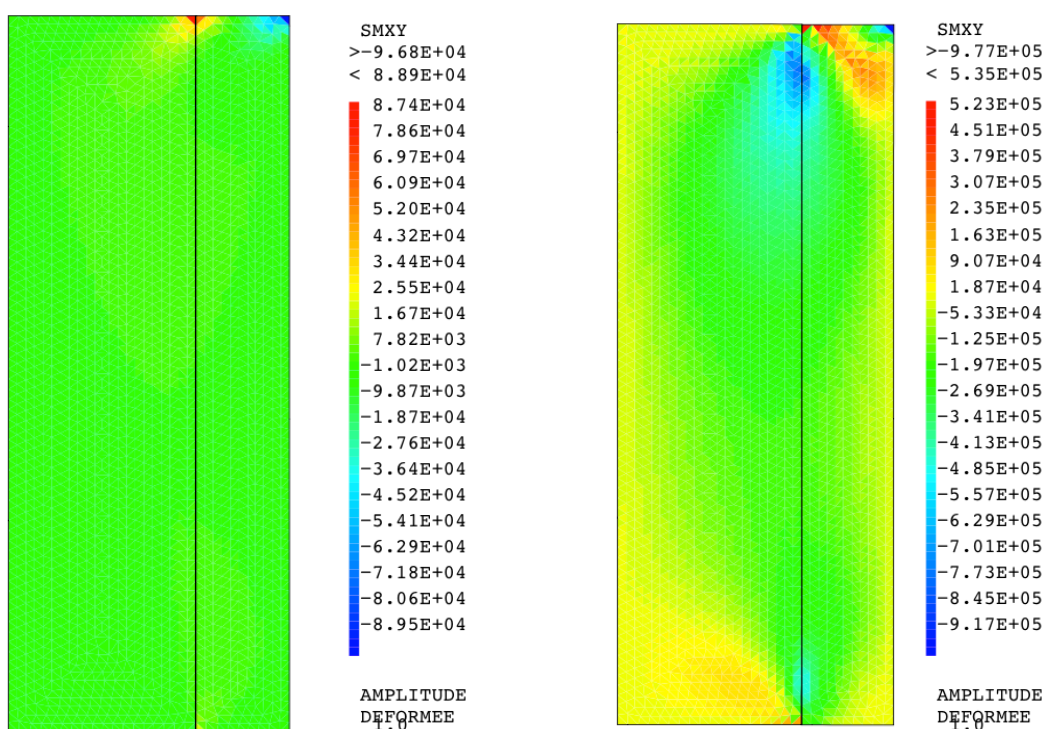


Figure 7: Courbe de la contrainte tangentielle en fonction du déplacement.

D'après la courbe précédente, nous avons dépassé la limite élastique du matériau.

On peut calculer la contrainte de cisaillement résultante :

Force de cisaillement $F_{\tau} = 1200 \text{ N}$

Surface de contact $S_{\tau} = 3530 \text{ mm}^2$

Contrainte de cisaillement : $\tau = \frac{F_{\tau}}{S_{\tau}} = 0,34 \text{ MPa}$

3. Modélisation des briques avec les plots :

Pour visualiser l'influence des plots sur le comportement au cisaillement des briques, nous avons modélisé la liaison entre les plots comme le montre le schéma ci-contre. La brique de gauche mesure 35,3 x 9,2 (cm) et celle de droite 35,3 x 4,6 (cm). Le maillage est composé d'éléments triangulaires avec une densité de 0,01. La brique de gauche est encadrée suivant \vec{x} et suivant \vec{y} . Nous avons imposé un déplacement \vec{U}_y de 3 mm et fait varier la force de confinement \vec{F} de 0,1 MPa à 2 MPa.

3.1 Programme Cast3m

En annexe se trouve le programme que nous avons écrit avec les commentaires d'explication [Terrecrue.dgibi].

Le programme est similaire à celui précédemment présenté cependant nous avons modifié la géométrie pour ajouter les plots.

3.2 Analyse des résultats

Pour chaque modélisation nous avons tracé la courbe force-déplacement et la répartition des contraintes tangentielles et normales.

Le tableau suivant permet de synthétiser les différents résultats. Pour chaque modélisation, nous avons calculé la contrainte de cisaillement maximale atteinte. On observe qu'elle augmente à mesure qu'on applique un confinement plus important.

On peut comparer ces résultats à ceux obtenus avec une surface de contact lisse. La contrainte de cisaillement augmente avec la présence des plots qui contribuent à la résistance au cisaillement des deux briques.

Tableau des résultats :

Modélisation n°	σ_N (MPa)	F_T (N)	S_T (mm ²)	$\tau = \frac{F_T}{S_T}$ (MPa)
1	0,1	720,67	3690	0,195
2	0,5	1504,1	3690	0,407
3	0,8	1561,7	3690	0,423
4	1	1584,9	3690	0,429
5	1,5	1584,0	3690	0,429
6	2	1590,8	3690	0,431

Page suivante sont présentées l'ensemble des courbes de force-déplacement pour les modélisations répertoriées dans le tableau précédent. On peut ainsi visualiser l'impact de la force de confinement sur le déplacement des briques.

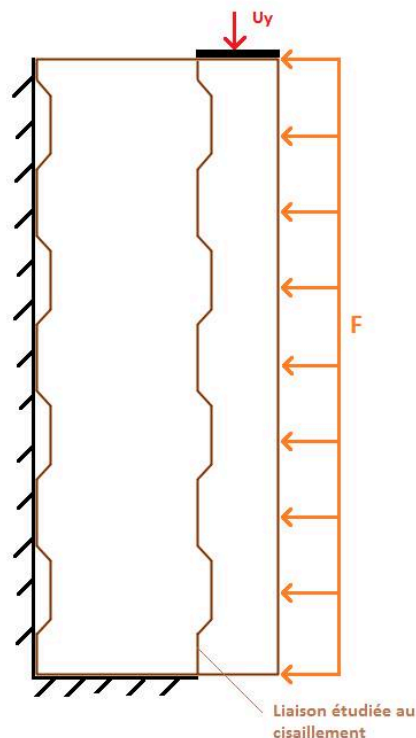
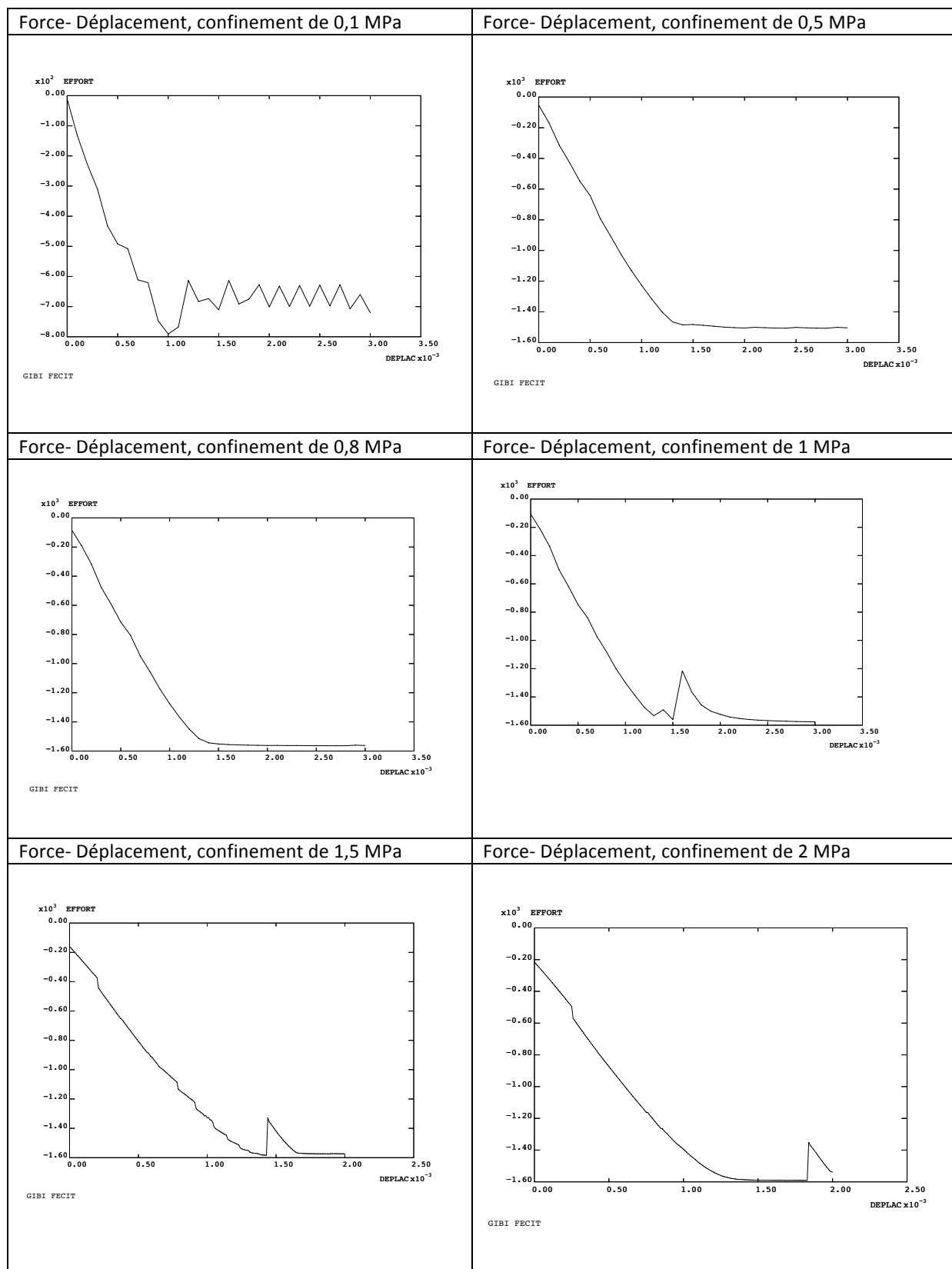


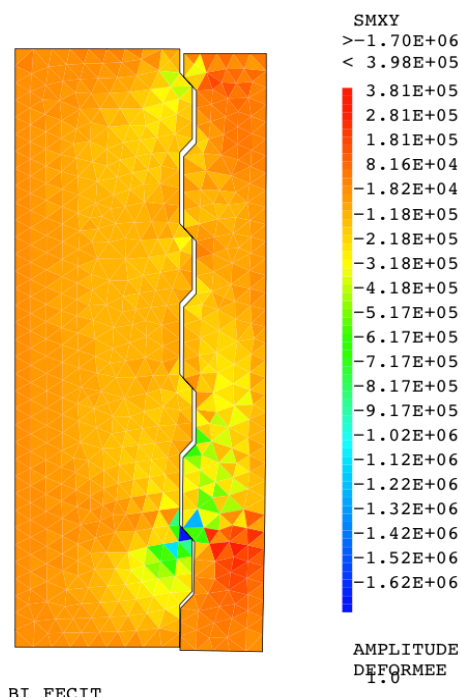
Figure 8: Schéma de la modélisation avec les plots

Dans le premier cas avec une force de confinement faible de 0,1 MPa il y a glissement de la brique sollicitée par rapport à l'autre (représentée par les irrégularités de la courbe). Sur les courbes suivantes, on observe que le confinement est suffisant pour qu'il ait adhérence.



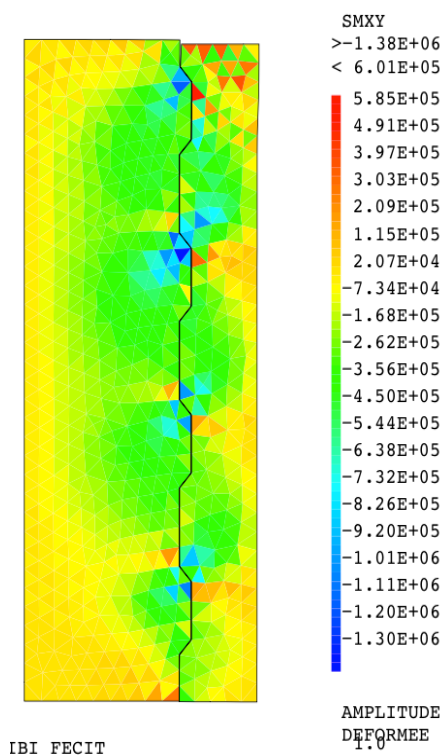
Si l'on regarde maintenant la répartition des contraintes tangentielles et normales dans les briques, on peut faire les observations suivantes :

Figure 9: Contrainte tangentielle, déplacement de 3 mm et confinement de 0,1 MPa



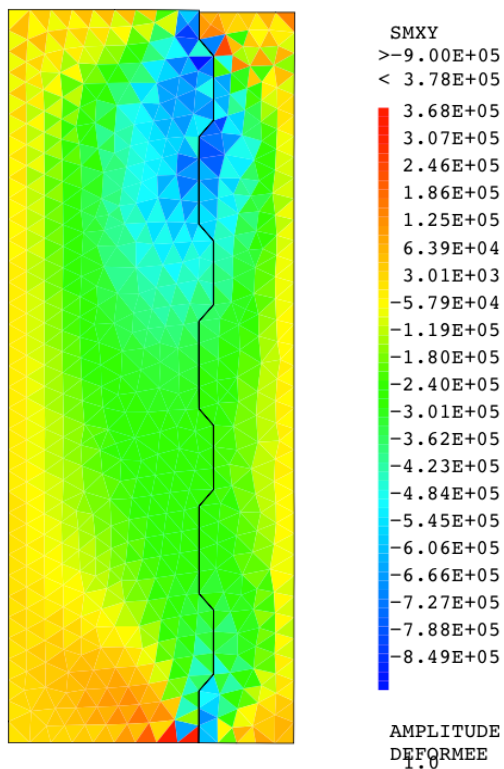
Avec une force de confinement faible de 0,1 MPa, la brique de droite glisse le long de la surface de contact avec la brique de gauche. On observe qu'à la fin de l'essai le plot le plus sollicité est celui du bas et plus particulièrement le haut du plot.

Figure 10 : Contrainte tangentielle, déplacement de 3 mm et confinement de 0,5 MPa



Nous avons ensuite augmenté la force de confinement jusqu'à 0,5 MPa. La force de confinement est suffisamment importante pour qu'il y ait adhérence entre les deux briques. Chaque plot contribue de manière équitable à la résistance au cisaillement. Logiquement, le haut du plot est plus sollicité que celui du bas.

Figure 11 : Contrainte tangentielle déplacement de 1,5 mm et un confinement de 2 MPa



Au delà d'une force de confinement de 0,8 MPa et jusqu'à 2 MPa, la répartition des contraintes de cisaillement n'est plus uniforme comme précédemment. Le premier plot reprend l'essentiel des contraintes de cisaillement : c'est la partie la plus sollicitée.

4. Conclusion

La modélisation aux éléments finis du problème nous a permis de visualiser la répartition des contraintes tangentielles et de déterminer une résistance au cisaillement, fonction de l'effort de confinement. Ceci vient conclure notre campagne d'essai de caractérisation de briques en terre crue.

Annexe n°1 [Annexe.dgibi]

<pre> OPTI DIME 2 ELEM TRI3 MODE PLAN CONT; *Densité DENS1=0.01; densite DENS1; *SIGE Y RESISTANCE ELASTIQUE SIGE=3E6; *caractéristiques de confinement des briques EP1=0.01; * Définition de la droite de contour *Définition des points P0=0. 0.; P1=0. 0.100; P2=0.050 0.100; P3=0.050 0.; D1=D P0 P1; D2=D P1 P2; D3=D P2 P3; D4=D P3 P0; CONT1= D1 ET D2 ET D3 ET D4; SURF1= SURF CONT1 coul bleu; *modèle de comportement MODE_SF1=MODE SURF1 MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE PARFAIT; TC=MATE MODE_SF1 YOUN 0.50E9 NU 0.165 DIM3 EP1 SIGY SIGE; *TRACER(SURF1); ***** *****Modele COQ2***** *élément rigide pour éviter le poinçonnement MODE_c = mode (D2) mecanique elastique coq2; MAT3 = mate MODE_c youn 210e9 nu 0.3 RHO 7.85E4; ep3 = CARB mode_c EPAI 0.01 ; mat3 = mat3 et ep3; *modèle total qui comprend le modèle des briques et le modèle de frottement MODE_TOT= MODE_SF1 ET MODE_c; *mtx total avec les briques et les conditions de frottement TC_TOT= TC ET mat3; ***** *****conditions aux limites***** ***** </pre>	<p>Remarques</p>
---	------------------

<pre> *déplacement vertical CL1=BLOQ P0 UX ; CL2=BLOQ D2 UY ; CL3=BLOQ D4 UY ; CL_TOT=CL1 ET CL2 ET CL3; * Déplacement vertical sur D2 DCL=depi (cl2) -1; *Chargements * LTPS1 = 'PROG' 0. 1. ; EV1 = 'EVOL' 'MANU' LTPS1 ('PROG' 0. 1.) ; CHARU1 = 'CHAR' 'DIMP' DCL EV1 ; ***** ***** Procédure pas à pas***** ***** * Construction de la table pas à pas TAB1 = 'TABL' ; TAB1 . 'MODELE' = MODE_TOT ; TAB1 . 'CARACTERISTIQUES' = TC_TOT ; TAB1 . 'BLOCAGES_MECANIQUES' = CL_TOT ; TAB1 . 'CHARGEMENT' = CHARU1 ; TAB1 . 'TEMPS_CALCULES' = 'PROG' 0. pas 0.00001 0.0015 ; *Résolution table 1 PASAPAS TAB1 ; ***** *****Post traitement***** ***** opti 'TRAC' psc 'FTRA' 'Courbe_S.ps'; * evN=@global tab1 ev1 cl2 fy; dess evN; * * ficT=chaine 'Efforts_N_DPLMT' ; @excell evN ficT; </pre>	<p>→ La condition CL2 permet plus tard d'imposer un déplacement en haut de la brique.</p> <p>→ Permet de tracer la courbe de force déplacement et de l'exporter sous excel pour la superposer avec les courbes expérimentales.</p>
---	--

Annexe n°2 GeometrieSimple.dgibi

<pre> OPTI DIME 2 ELEM TRI3 MODE PLAN CONT ; *Densité DENS1=0.005; densite DENS1; *caractéristiques de confinement des briques EP1=0.01; PRESS1=1.E; *SIGE Y RESISTANCE ELASTIQUE SIGE=3E6; *Définition des points P0=0. 0. ; P17=0. 0.353; P18=0.092 0.353; P35=0.092 0.; P19=0.138 0.353; P36=0.138 0.; *dissociation des points de jonctions P20=P18 plus (0. 0.); P37=P35 plus (0. 0.); ***** *****BRIQUE 1***** ***** D1=D P0 P17; D2=D P17 P18; D3=D P18 P35; D4=D P35 P0; CONT1= D1 ET D2 ET D3 ET D4; SURF1= SURF CONT1 coul bleu; *modèle de comportement de la brique 1 avec le mode_SF1 et TC1 MODE_SF1=MODE SURF1 MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE PARFAIT; TC1=MATE MODE_SF1 YOUN 0.5E9 NU 0.155 DIM3 EP1 SIGY SIGE; ***** *****BRIQUE 2***** ***** D5=D P37 P20; D6=D P20 P19; D7=D P19 P36; D8=D P36 P37; CONT2= D5 ET D6 ET D7 ET D8; </pre>	<p>Remarques</p> <p>→J'ai dissocié les points à la jonction des deux briques pour qu'elles soient indépendantes.</p>
--	--


```

SURF2= SURF CONT2 coul rouge;

*modèle de comportement de la brique 2 avec le
mode_SF2 et TC2

MODE_SF2=MODE SURF2 MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE
PARFAIT;

TC2=MATE MODE_SF2 YOUN 0.5E9 NU 0.155 DIM3 EP1 SIGY
SIGE;

*TRACER(SURF1 ET SURF2);

stot = surf1 et surf2;

*****
***** modèle de contact frottement*****
*****

*condition de contact entre D3 et D5

MAILTC= 'IMPO' 'MAIL' D3 D5 ;

*modèle de frottement coulomb
MODE_FRO = MODE MAILTC CONTACT 'FROTTANT' 'COULOMB';

*définition des caractéristiques de frottement du
mtx
TC_FRO = MATE MODE_FRO 'MU' 0.62 ;

*****
*****Modele COQ2*****

*élément rigide pour éviter le poinçonnement

mod3 = mode (D6) mecanique elastique coq2;
mat3 = mate mod3 youn 210e9 nu 0.3 RHO 7.85E4;
ep3 = CARB mod3 EPAI 0.01 ;

mat3 = mat3 et ep3;

*modèle total qui comprend le modèle des briques et
le modèle de frottement

MODE_TOT= MODE_SF1 ET MODE_SF2 ET MODE_FRO ET mod3;

*mtx total avec les briques et les conditions de
frottement

TC_TOT= TC1 ET TC2 ET TC_FRO ET mat3;

*****
*****conditions aux limites*****
*****

*déplacement horizontal
CL1=BLOQ D1 UX;

*déplacement vertical
CL2=BLOQ D4 UY ;

```

```

CL3=BLOQ D6 UY ;

CL_TOT= CL1 ET CL2 ET CL3;

confl=form;

* Pression de confinement horizontale appliquée sur
D6
F1=PRESSION MASSIF MODE_SF2 (1000) D7;

* Déplacement vertical sur D7
DCL=depi (cl3) -1;

* Chargements :
*

LTPS1      = 'PROG' 0. 1. 2. ;
EV1        = 'EVOL' 'MANU' LTPS1 ('PROG' 0. 1. 1.) ;
EV2        = 'EVOL' 'MANU' LTPS1 ('PROG' 0. 0. 1.) ;
CHARU1     = 'CHAR' 'MECA' F1 EV1 ;
CHARU2     = 'CHAR' 'DIMP' DCL EV2 ;
CHAR_TOT   = CHARU1 ET CHARU2 ;

*****
***** Procédure pas à pas*****
*****
* Construction de la table pas à pas

TAB1              = 'TABL' ;
TAB1 . 'MODELE'   = MODE_TOT ;
TAB1 . 'CARACTERISTIQUES' = TC_TOT ;
TAB1 . 'BLOCAGES_MECANIQUES' = CL_TOT ;
TAB1 . 'CHARGEMENT' = CHAR_TOT ;
TAB1 . 'TEMPS_CALCULES' = 'PROG' 0. pas 0.1 1.
pas 0.0001 1.005 ;

*Résolution table 1
PASAPAS TAB1 ;

*****
***** Post traitement *****
*****
*****Contrainte tangentiel / Déplacement
tangentielle*****

opti 'TRAC' psc 'FTRA' 'Courbe_S.ps';
evT=@global tab1 EV2 cl3 fy;
dess evt;
ficT=chaine 'Efforts_T.csv' ;
@excell evT ficT;

*****SIGMA_xy*****

opti 'TRAC' psc 'FTRA' 'sigmay.ps';
Ni = dime tab1.temps;

Form confl;

```

```

DEF1 = defo TAB1.DEPLACEMENTS.(0) stot 1;
SMXY = exco tabl.contraintes.(0) 'SMXY';
trac SMXY MODE_TOT DEF1 (CONT1 et CONT2);

Ni = dime tabl.temps;
REPETER BOU1 (Ni-1);
    Form conf1;
    DEP1=TAB1.DEPLACEMENTS.(&BOU1);
    DEF1 = defo dep1 stot 1;
    SMXY = exco tabl.contraintes.(&BOU1) 'SMXY';
    trac SMXY MODE_TOT DEF1 (CONT1 et CONT2);
FIN BOU1;

*****SIGMA_xx*****
opti 'TRAC' psc 'FTRA' 'sigmax.ps';
Ni = dime tabl.temps;
Form conf1;
DEF1 = defo TAB1.DEPLACEMENTS.(0) stot 1;
SMXX = exco tabl.contraintes.(0) 'SMXX';
trac SMXX MODE_TOT DEF1 (CONT1 et CONT2);

Ni = dime tabl.temps;
REPETER BOU1 (Ni-1);
    Form conf1;
    DEP1=TAB1.DEPLACEMENTS.(&BOU1);
    DEF1 = defo dep1 stot 1;
    SMXX = exco tabl.contraintes.(&BOU1) 'SMXX';
    trac SMXX MODE_TOT DEF1 (CONT1 et CONT2);
FIN BOU1;

```

→ on crée une boucle qui permet de une image pour chaque pas de calcul.

Annexe n°3 [Terrecrue.dgibi]

```
OPTI DIME 2 ELEM TRI3 MODE PLAN CONT;
```

```
*Définition de la géométrie
```

```
*Densité
```

```
DENS1=0.01;
```

```
densite DENS1;
```

```
*****
*****BRIQUE 1*****
*****
```

```
P0=0. 0.;
```

```
P17=0. 0.353;
```

```
P18=0.092 0.353;
```

```
P19=0.092 0.339;
```

```
P20=0.099 0.331;
```

```
P21=0.099 0.300;
```

```
P22=0.092 0.292;
```

```
P23=0.092 0.250;
```

```
P24=0.099 0.242;
```

```
P25=0.099 0.211;
```

```
P26=0.092 0.203;
```

```
P27=0.092 0.161;
```

```
P28=0.099 0.153;
```

```
P29=0.099 0.122;
```

```
P30=0.092 0.114;
```

```
P31=0.092 0.072;
```

```
P32=0.099 0.064;
```

```
P33=0.099 0.033;
```

```
P34=0.092 0.025;
```

```
P35=0.092 0.;
```

```
*Coté n°1 "gauche"
```

```
D1=D P0 P17;
```

```
* Coté n°2 "haut"
```

```
D171=D P17 P18;
```

```
* Coté n°4 "bas"
```

```
D341=D P35 P0;
```

```
* coté "gauche"
```

```
CONTGB1=D341 ET D1 ET D171;
```

```
* Coté n°3 "droite"
```

```
D18=D P18 P19;
```

```
D19=D P19 P20;
```

```
D20=D P20 P21;
```

```
D21=D P21 P22;
```

```
D22=D P22 P23;
```

```
D23=D P23 P24;
```

```
D24=D P24 P25;
```

```
D25=D P25 P26;
```

```
D26=D P26 P27;
```

```
D27=D P27 P28;
```

```

D28=D P28 P29;
D29=D P29 P30;
D30=D P30 P31;
D31=D P31 P32;
D32=D P32 P33;
D33=D P33 P34;
D34=D P34 P35;

CONTDB1= D18 ET D19 ET D20 ET D21 ET D22 ET D23
        ET D24 ET D25 ET D26 ET D27 ET D28 ET D29
ET D30

        ET D31 ET D32 ET D33 ET D34;

CONTB1=CONTGB1 ET CONTDB1;

SURF1= SURF (CONTB1) coul bleu;

*****
*****BRIQUE 2*****
*****

P18B2=0.092 0.353;
P19B2=0.092 0.339;
P20B2=0.099 0.331;
P21B2=0.099 0.300;
P22B2=0.092 0.292;
P23B2=0.092 0.250;
P24B2=0.099 0.242;
P25B2=0.099 0.211;
P26B2=0.092 0.203;
P27B2=0.092 0.161;
P28B2=0.099 0.153;
P29B2=0.099 0.122;
P30B2=0.092 0.114;
P31B2=0.092 0.072;
P32B2=0.099 0.064;
P33B2=0.099 0.033;
P34B2=0.092 0.025;
P35B2=0.092 0.;

* Coté n°1 "gauche"

D18B2=D P18B2 P19B2;
D19B2=D P19B2 P20B2;
D20B2=D P20B2 P21B2;
D21B2=D P21B2 P22B2 ;
D22B2=D P22B2 P23B2;
D23B2=D P23B2 P24B2;
D24B2=D P24B2 P25B2;
D25B2=D P25B2 P26B2;
D26B2=D P26B2 P27B2;
D27B2=D P27B2 P28B2;
D28B2=D P28B2 P29B2 ;
D29B2=D P29B2 P30B2;
D30B2=D P30B2 P31B2;
D31B2=D P31B2 P32B2;
D32B2=D P32B2 P33B2;

```

```

D33B2=D P33B2 P34B2;
D34B2=D P34B2 P35B2;

CONTGB2= D18B2 ET D19B2 ET D20B2 ET D21B2 ET
D22B2 ET D23B2

      ET D24B2 ET D25B2 ET D26B2 ET D27B2 ET
D28B2 ET D29B2 ET D30B2

      ET D31B2 ET D32B2 ET D33B2 ET D34B2;

* Coté n°2, n°3 et n°4

P36B2=0.138 0.;
P37B2=0.138 0.353;

D35B2=D P35B2 P36B2;
D36B2=D P36B2 P37B2;
D37B2=D P37B2 P18B2;

CONTDB2= D35B2 ET D36B2 ET D37B2;
CONTB2=CONTGB2 ET CONTDB2;

SURF2= SURF (CONTB2) coul rouge;

*****
*****BRIQUE 1&2*****
*****
STOT=SURF1 ET SURF2;
*TRACER ( STOT );

*****
*****
*Définition du modèle
*****
*****

*caracteristiques de confinement des briques.

EP1=0.01;
PRESS1=1.E;

*SIGE Y RESISTANCE ELASTIQUE
SIGE=3E6;

*****

***MODELE BRIQUE 1*****
*****

MODE_B1=MODE      SURF1      MECANIQUE      ELASTIQUE
PLASTIQUE PARFAIT;

TCB1=MATE MODE_B1 YOUN 0.5E9 NU 0.155 DIM3 EP1

```

```

SIGY SIGE;

*****

****MODELE BRIQUE 2*****

*****

MODE_B2=MODE      SURF2      MECANIQUE      ELASTIQUE
PLASTIQUE PARFAIT;

TCB2=MATE MODE_B2 YOUN 0.5E9 NU 0.155 DIM3 EP1
SIGY SIGE;

*****
****MODELE CONTACT *****
*****

*condition de contact entre CONTDB1 et CONTGB2
MAILTC= 'IMPO' 'MAIL' CONTGB2 (inve CONTDB1);

*modèle de frottement coulomb
MODE_FRO = MODE MAILTC CONTACT 'FROTTANT'
'COULOMB';

*définition des caractéristiques de frottement
du mtx
TC_FRO = MATE MODE_FRO 'MU' 0.62 ;

*****
****MODELE COQ *****
*****

*élément rigide pour éviter le poinçonnement
MOD3 = mode (D37B2) mecanique elastique coq2;
MAT3 = mate mod3 youn 210e9 nu 0.3 RHO 7.85E4;
EP3 = CARB mod3 EPAI 0.01 ;
MAT3 = mat3 et ep3;

*****

****MODELE TOTAL *****
*****

*modèle total qui comprend le modèle des
briques et le modèle de frottement

MODE_TOT= MODE_B1 ET MODE_B2 ET MODE_FRO ET
MOD3;

*mtx total avec les briques et les conditions
de frottement

TC_TOT= TCB1 ET TCB2 ET TC_FRO ET MAT3;

```

```

*****
*****conditions aux limites*****
*****

*déplacement horizontal
CL1=BLOQ D1 UX;

*déplacement vertical bas de la brique 1
CL2=BLOQ D341 UY ;

*déplacement vertical haut de la brique 2 pour
positionner le déplacement
CL3=BLOQ D37B2 UY ;

CL_TOT= CL1 ET CL2 ET CL3;

*mémorisation du modèle
confl=form ;

* Pression de confinement horizontale appliquée
sur D36B2
F1=PRESSION MASSIF MODE_B2 (20000) D36B2;

* Déplacement vertical sur D37B2
DCL=depi (cl3) -1;

* Chargements

LTPS1      = 'PROG' 0. 1. 2. ;
EV1        = 'EVOL' 'MANU' LTPS1 ('PROG' 0. 1.
1.) ;
EV2        = 'EVOL' 'MANU' LTPS1 ('PROG' 0. 0.
1.) ;
CHARU1     = 'CHAR' 'MECA' F1 EV1 ;
CHARU2     = 'CHAR' 'DIMP' DCL EV2 ;
CHAR_TOT   = CHARU1 ET CHARU2 ;

*****
***** Procédure pas à pas*****
*****
* Construction de la table pas à pas

TAB1              = 'TABL' ;
TAB1 . 'MODELE'   = MODE_TOT ;
TAB1 . 'CARACTERISTIQUES' = TC_TOT ;
TAB1 . 'BLOCAGES_MECANIQUES' = CL_TOT ;
TAB1 . 'CHARGEMENT' = CHAR_TOT ;
TAB1 . 'TEMPS_CALCULES' = 'PROG' 0. pas
0.1 1. pas 0.00001 1.002 ;

*Résolution table 1

PASAPAS TAB1 ;

*****
***** Post traitement *****
*****

```



```

*****Contrainte tangentiel / Deplacement
tangentielle*****

opti 'TRAC' psc 'FTRA' 'Courbe.ps';
evT=@global tab1 EV2 CL3 fy;
dess evt;
fict=chaine 'Efforts_N_DPLMT' ;
@excell evT fict;

*****SIGMA_xy*****

opti 'TRAC' psc 'FTRA' 'sigmaxy.ps';
Ni = dime tab1.temps;

Form conf1;
DEP1 = defo TAB1.DEPLACEMENTS.(0) STOT 1;
SMXY = exco tab1.contraintes.(0) 'SMXY';
trac SMXY MODE_TOT DEP1 (CONTB1 et CONTB2);

Ni = dime tab1.temps;
REPETER BOUCLE (Ni-1);
  Form conf1;
  DEP1=TAB1.DEPLACEMENTS.(&BOUCLE);
  DEF1 = defo DEP1 STOT 1;
  SMXY = exco tab1.contraintes.(&BOUCLE)
'SMXY';
  trac SMXY MODE_TOT DEF1 (CONTB1 et
CONTB2);
FIN BOUCLE;

*****SIGMA_xx*****

opti 'TRAC' psc 'FTRA' 'sigmax.ps';
Ni = dime tab1.temps;

Form conf1;
DEF1 = defo TAB1.DEPLACEMENTS.(0) stot 1;
SMXX = exco tab1.contraintes.(0) 'SMXX';
trac SMXX MODE_TOT DEF1 (CONTB1 et CONTB2);

Ni = dime tab1.temps;

REPETER BOU1 (Ni-1);
  Form conf1;
  DEP1=TAB1.DEPLACEMENTS.(&BOU1);
  DEF1 = defo dep1 stot 1;
  SMXX = exco tab1.contraintes.(&BOU1)
'SMXX';
  trac SMXX MODE_TOT DEF1 (CONTB1 et
CONTB2);
FIN BOU1;

```