SSLS134 - Ferraillage selon la méthode de Capra et Maury : calcul analytique

Résumé :

Ce test concerne la vérification analytique des densités de ferraillage calculées à l'aide de l'opérateur CALC_FERRAILLAGE.
Plusieurs cas de chargements sont étudiés à l'ELS et à l'ELU en utilisant 3 codes le BAEL, l'eurocode 2 et un code « utilisateur ».

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

On considère une plaque carrée de coté $1\,m$ et d'épaisseur $0{,}2\,m$.

1.2 Propriétés du matériau

Néant.

1.3 Conditions aux limites et chargements

Il n'y a pas réellement de calcul mécanique.
On s'arrange pour que le champ d'efforts dans la plaque corresponde à l'une des 10 configurations suivantes :

1. force de compression de $1\,000\,000\,\mathrm{N}$ exercée suivant l'axe Y , et un effort tranchant de $100\,000\,\mathrm{N}$ suivant Y
2. force de traction de $1\,000\,000\,\mathrm{N}$ exercée suivant l'axe X, et un effort tranchant de $-600\,000\,\mathrm{N}$ suivant X
3. force de traction de $1\,000\,000\,\mathrm{N}$ exercée suivant l'axe Y ,et un effort tranchant de $-20\,000\,\mathrm{N}$ suivant X et de $80\,000\,\mathrm{N}$ suivant Y
4. moment de flexion de $100\,000\,\mathrm{Nm}$ autour de l'axe X.
5. moment de flexion de $100\,000\,\mathrm{Nm}$ autour de l'axe Y .
6. moment de flexion de $100\,000\,\mathrm{Nm}$ autour de l'axe Y et force de compression de $100\,000\,\mathrm{N}$ (à l'ELU) et $20\,000\,\mathrm{N}$ à l'ELS exercée suivant l'axe X
7. moment de flexion de $100\,000\,\mathrm{Nm}$ autour de l'axe Y et force de traction de $100\,000\,\mathrm{N}$ exercée suivant l'axe X
8. moment de flexion de $100\,000\,\mathrm{Nm}$ autour de l'axe Y et force de traction de $2\,000\,000\,\mathrm{N}$ exercée suivant l'axe X
9. moment de flexion de $100\,000\,\mathrm{Nm}$ autour de l'axe Y et moment de flexion de $-75\,000\,\mathrm{Nm}$ autour de l'axe X
10. moment de flexion de $-150\,000\,\mathrm{Nm}$ (à l'ELU) et $-100\,000\,\mathrm{Nm}$ à l'ELS autour de l'axe X .
11. moment de flexion de $-260\,000\,\mathrm{Nm}$ (à l'ELU).
12. moment de flexion de $-380\,000\,\mathrm{Nm}$ (à l'ELU).
13. force de compression de $1\,500\,000\,\mathrm{N}$ exercée suivant l'axe Y , et un effort tranchant de $800\,000\,\mathrm{N}$ suivant Y (à l'ELU)
14. force de compression de $4\,500\,000\,\mathrm{N}$ exercée suivant l'axe X , et un effort tranchant de $100\,000\,\mathrm{N}$ suivant Y (à l'ELU)

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1.4 Autres paramètres de calcul

Les enrobages (supérieurs et inférieurs) sont fixés à $e=4\,\mathrm{cm}$. Les calculs sont effectués à l'État Limite Ultime (ELU) et à l'État Limite de Service (ELS).

Modélisation	A	B	C	D
Codification	UTILISATEUR	BAEL	EC2	EC2
Enrobage inférieur	4 cm			4 cm
Enrobage supérieur				2 cm
f_e : limite caractéristique d'élasticité de l'acier de l'armature		$500\,\mathrm{MPa}$	$500\,\mathrm{MPa}$	$500\,\mathrm{MPa}$
γ_s		1,15	1,15	1,15
σ_s : limite d'élasticité de l'acier à l'ELU	435 MPa	$\sigma_s=\frac{f_e}{\gamma_s}=434{,}78\,MPa$		
σ_s^{els} : limite d'élasticité de l'acier à l'ELS	400 MPa			
f_{cj} : résistance caractéristique en compression du béton		35 MPa	35 MPa	55 MPa
γ_c		1,5	1,5	1,5
α_{cc}		0,85	1	1
σ_b : résistance en compression du béton à l'ELU	23,3 MPa	$\frac{\alpha_{cc} f_{cj}}{\gamma_c}$ $19{,}33\,MPa$	$\frac{\alpha_{cc} f_{cj}}{\gamma_c}$ $23{,}33\,MPa$	$\frac{\alpha_{cc} f_{cj}}{\gamma_c}$ $36{,}37\,MPa$
σ_b^{els} : résistance en compression du béton à l'ELS	21 MPa			33 MPa
E_a : module d'Young de l'acier	210 GPa			
PIV_A	$10‰$	Par défaut : $10‰$	Classe d'acier B : $\varepsilon_{uk}=5\%$ $PIV_A=0{,}9\varepsilon_{uk}$	Classe d'acier A : $\varepsilon_{uk}=2{,}5\%$ $PIV_A=0{,}9\varepsilon_{uk}$
PIV_B	$3{,}5‰$	Par défaut : $3{,}5‰$		
N ou CEQUI ou ALPHA_E : valeur du coefficient d'équivalence à l'ELS	15,1	15,1	21	

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul

Les densités des aciers longitudinaux sont calculées selon la méthode de Capra et Maury. Compte tenu des directions des efforts, la facette « dimensionnante » est évidente. Le calcul analytique se résume donc à un calcul de section permettant de déterminer les efforts auxquels sont soumis les 2 lits d'acier (supérieur et inférieur). Trois codes sont utilisés mais les solutions de références sont généralement assez proches. Les efforts et moments sont donnés en convention « génie civil », la compression est positive.

2.2 Grandeurs et résultats de référence

2.2.1 Configuration 1

La plaque est soumise à une compression de $N_{yy}=1\,000\,000\,\mathrm{N}$ et à un effort tranchant $Q_y=100\,000\,\mathrm{N}$.

Ferraillage longitudinal :
ELU : 0 dans toutes les directions.
ELS : 0 dans toutes les directions.

Ferraillage transversal :
Pour les codes « utilisateur » et BAEL, seul l'effort tranchant est pris en compte :

$A_{ST}=\frac{\sqrt{Q_x^2+Q_y^2}}{z(\cot\theta+\cot\alpha)\sin\alpha\sigma_s}=\frac{\sqrt{Q_x^2+Q_y^2}}{z\sigma_s}$ où $\alpha=90°$ et $\theta=45°$ et $z=0{,}9(h-c)$

Pour le code « utilisateur » $A_{ST}=15{,}964\,cm^2/m^2$, pour le code BAEL $A_{ST}=15{,}967\,cm^2/m^2$

A l'Eurocode 2, le calcul du ferraillage transversal est différent, il tient compte de l'effort normal de compression : $Q_{max}=100000\,N$

L'effort normal correspondant à cette section ($\theta=\frac{-\pi}{2}$) est de $N=N_{yy}\sin(\theta)^2=1000000\,N$.

$\sigma_{cp}=\frac{N}{h}>0$ On a donc $\frac{\sigma_{cp}}{\sigma_b}=0{,}214<0{,}25$ donc $\alpha_{cc}=1+\frac{\sigma_{cp}}{\sigma_b}=1{,}214$

$v_1=0.6\left(1-\frac{f_{ck}}{250}\right)=0.516$ et donc $X=\frac{Q_{max}}{zv_1\alpha_{cc}}=0.057$ et comme $X=0.3448$: $\cot\theta=2.5$

$A_{ST}=\frac{Q_{max}}{zcot\,\theta\,\sigma_s}=6{,}3888888\,\mathrm{cm^2/m^2}$ avec $z=0{,}9(h-c)$

2.2.2 Configuration 2

La plaque est soumise à un effort de traction de $N_{xx}=-1\,000\,000\,\mathrm{N}$ selon l'axe X et d'un effort tranchant $Q_x=-600\,000\,\mathrm{N}$.

Ferraillage longitudinal :
Il s'agit d'une section entièrement tendue de manière symétrique.

La section d'acier est donc égale à $A_S=\frac{N}{\sigma_s}$.

Chaque lit d'armatures reprend donc la moitié de l'effort soit : $A_{SXS}=A_{SXI}=\frac{A_S}{2}$

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

	UTILISATEUR	BAEL	Eurocode 2 (C et D)
ELU	11.494	11.5	11.5
ELS	12.5	12.5	12.5

La densité d'armature théorique suivant l'axe Y est nulle compte tenu de l'absence d'effort dans cette direction.

Ferraillage transversal :
Pour les codes « utilisateur » et BAEL, seul l'effort tranchant est pris en compte :

$$A_{ST}=\frac{\sqrt{Q_x^2+Q_y^2}}{z(\cot\theta+\cot\alpha)\sin\alpha\sigma_s}=\frac{\sqrt{Q_x^2+Q_y^2}}{z\sigma_s} \text{ où } \alpha=90° \text{ et } \theta=45°$$

Pour le code « utilisateur » $A_{ST}=95,785\,cm^2/m^2$, pour le code BAEL $A_{ST}=95,833\,cm^2/m^2$
L'effort normal correspondant à cette section ($\theta=0$) est de $N=N_{xx}\cos(\theta)^2=1000000\,N$ en traction (donc négatif au sens génie civil).

A l'Eurocode 2 (modélisation C et D), le calcul du ferraillage transversal est différent, il tient compte de l'effort normal de compression : $Q_{max}=600000\,N$

$\sigma_{cp}=\frac{N}{h}\leq 0$ On a donc $\alpha_{cc}=1$

$v_1=0.6\left(1-\frac{f_{ck}}{250}\right)=0.516(C)\,et\,0,468(D)$ et donc $X=\frac{Q_{max}}{zv_1\alpha_{cc}}=0.346(C)\,et\,0,216(D)$

en (C) $X\geq 0.3448$: $\cot\theta=2,488$ d'où $A_{ST}=\frac{Q_{max}}{zcot\theta\sigma_s}=38,524\,\text{cm}^2/\text{m}^2$ avec $z=0,9(h-c)$

en (D) $X<0.3448$: $\cot\theta=2.5$ $A_{ST}=\frac{Q_{max}}{zcot\theta\sigma_s}=34,074\,\text{cm}^2/\text{m}^2$ avec $z=0,9(h-c_{\text{sup}})$

2.2.3 Configuration 3

La plaque est soumise à un effort de traction de $N_{yy}=-1\,000\,000\,\text{N}$ selon l'axe X et d'un effort tranchant $Q_x=-20\,000\,\text{N}$ et $Q_y=80\,000\,\text{N}$.

Ferraillage longitudinal :
Les résultats théoriques sont les symétriques de ceux de la configuration 2 : $A_{SYS}=A_{SYI}$

	UTILISATEUR	BAEL	Eurocode 2
ELU	11.494	11.5	11.5
ELS	12.5	12.5	12.5

Ferraillage transversal :
Pour les codes « utilisateur » et BAEL, seul l'effort tranchant est pris en compte :

$$A_{ST}=\frac{\sqrt{Q_x^2+Q_y^2}}{z(\cot\theta+\cot\alpha)\sin\alpha\sigma_s}=\frac{\sqrt{Q_x^2+Q_y^2}}{z\sigma_s}=13.164/15.805\,\text{cm}^2/\text{m}^2$$

où $\alpha=90°$ et $\theta=45°$ avec $z=0.9(h-c)$ (UTILISATEUR) et $z=h-2c$ (BAEL)

A l'Eurocode 2, le calcul du ferraillage transversal est différent, il tient compte de l'effort normal de compression : $Q_{max}=82450,44\,N$

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

L'effort normal correspondant à cette section ($\theta=\frac{\pi}{12}$) est de $N=N_{yy}\sin(\theta)^2=66987{,}3\,N$ en traction (donc négatif au sens génie civil).

$\sigma_{cp}=\frac{N}{h}\leq 0$ On a donc $\alpha_{cc}=1$

$v_1=0.6\left(1-\frac{f_{ck}}{250}\right)=0.516$ et donc $X=\frac{Q_{max}}{0.9\,dv_1\alpha_{cc}}=0.057$ et comme $X\leqslant 0.3448$: $\cot\theta=2.5$

$A_{ST}=\frac{Q_{max}}{z\cot\theta\,\sigma_s}=6.32\,\text{cm}^2/\text{m}^2$ avec $z=h-2c$

2.2.4 Configuration 4

La plaque est soumise à un moment de flexion suivant Y (autour de l'axe X) égal à $M_{fx}=-100\,000\,\text{Nm}$. Ce moment de flexion correspond à une fibre supérieure tendue.

A l'ELU : (les valeurs sont données dans l'ordre « utilisateur » / BAEL/ Eurocode 2)

Le moment ultime réduit $\mu=\frac{M_{fx}}{d^2\sigma_b}=0.167/0.196/0.167$.

La position relative de la fibre neutre $\alpha=1-\sqrt{1-2\mu}=0.184/0.221/0.184$.

Le bras de levier réduit $z=d\left(1-\frac{\alpha}{2}\right)=0.145/0.142/0.145$.

La section d'armature est donc égale à $A_{SYS}=\frac{M_{fx}}{z\,\sigma_s}=15.83/16.165/15.835\,\text{cm}^2/\text{m}$ (lit Y supérieur).

A l'ELS : (les valeurs sont données dans l'ordre « utilisateur » / BAEL/ Eurocode 2)

Le moment résistant du béton est égal à :

$M_{\lim}=\frac{1}{2}\sigma_b y_{\lim}\left(d-\frac{y_{\lim}}{3}\right)=101\,342/101342/116315\,\text{Nm}$

avec $y_{\lim}=d\,\frac{n\sigma_b}{n\sigma_b+\sigma_s}=0.0707/0.0707/0.0839\,\text{m}$

Nous sommes donc dans le cas où $M=M_{fx}\leqslant M_{\lim}$. Ainsi, seuls des aciers tendus sont nécessaires.

Le moment réduit de service est égal à : $\mu=n\,\frac{M}{d^2\sigma_s}=0.148/0.148/0.205$

Le coefficient α est solution de l'équation : $\alpha^3-3\alpha^2-6\mu(1-\alpha)=0$

Par résolution itérative, on obtient : $\alpha=0.440/0.440/0.497$

La section d'acier nécessaire est égale à : $A_{SYS}=\frac{M_{fx}}{\sigma_s\,d\left(1-\frac{\alpha}{3}\right)}=18.31/18.31/18.729\,\text{cm}^2/\text{m}$

2.2.5 Configuration 5

Les résultats théoriques sont les symétriques de ceux de la configuration 4.

La section d'armature est donc égale à $A_{SXS}=15.83/16.165/15.835\,\text{cm}^2/\text{m}$ (lit X supérieur) à l'ELU.

La section d'armature est donc égale à $A_{SXS}=18.31/18.31/18.729\,\text{cm}^2/\text{m}$ (lit X supérieur) à l'ELS.

Pour la modélisation D, $d=h-c_{\text{sup}}$ car $M_{fy}<0$:

Le moment ultime réduit $\mu=\frac{M_{fy}}{d^2\sigma_b}=0.0863$.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

La position relative de la fibre neutre $\alpha = 1 - \sqrt{1-2\mu} = 0.0904$.
Le bras de levier réduit $z = d\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) = 0.172$.

La section d'armature est donc égale à $A_{SXS} = \frac{M_{fy}}{z\,\sigma_s} = 13.383\,\text{cm}^2/\text{m}$ (lit Y supérieur).

A l'ELS, le moment résistant du béton est égal à :

$$M_{\lim} = \frac{1}{2}\sigma_b y_{\lim}\left(d - \frac{y_{\lim}}{3}\right) = 267318\,\text{Nm}$$

avec $y_{\lim} = d\,\frac{n\,\sigma_b}{n\,\sigma_b + \sigma_s} = 0.114\,\text{m}$

Nous sommes donc dans le cas où $M = M_{fx} \leqslant M_{\lim}$. Ainsi, seuls des aciers tendus sont nécessaires.

Le moment réduit de service est égal à : $\mu = n\,\frac{M}{d^2\,\sigma_s} = 0.162$

Le coefficient α est solution de l'équation : $\alpha^3 - 3\,\alpha^2 - 6\,\mu\,(1-\alpha) = 0$
Par résolution itérative, on obtient : $\alpha = 0.456$

La section d'acier nécessaire est égale à : $A_{SYS} = \frac{M_{fx}}{\sigma_s\, d\left(1 - \frac{\alpha}{3}\right)} = 16.378\,\text{cm}^2/\text{m}$

2.2.6 Configuration 6

La plaque est soumise à un moment de flexion suivant X (autour de l'axe Y) égal à $M_{fy} = -100\,000\,\text{Nm}$ et à un effort de compression suivant X égal à $N_{xx} = 100\,000\,\text{N}$ à l'ELU et égal à $N_{xx} = 20\,000\,\text{N}$ à l'ELS.

La section est partiellement tendue.

A l'ELU :(les valeurs sont données dans l'ordre « utilisateur » / BAEL/ Eurocode 2)
Le moment à reprendre est $M = M_{fy} - N_{xx}\left(d - \frac{h}{2}\right) = 106\,000\,\text{Nm}$

Le moment ultime réduit $\mu = \frac{M}{d^2\,\sigma_b} = 0.178/0.209/0.177$.
La position relative de la fibre neutre $\alpha = 1 - \sqrt{1-2\,\mu} = 0.197/0.237/0.197$.
Le bras de levier réduit $z = d\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) = 0.144/0.141/0.144$.

La section d'armature est donc égale à $A_{SXS} = \frac{M}{z\,\sigma_s} + \frac{N_{xx}}{\sigma_s} = 14.596/14.984/14.601\,\text{cm}^2/\text{m}$ (lit X supérieur).

A l'ELS :(les valeurs sont données dans l'ordre « utilisateur » / BAEL/ Eurocode 2)

L'effort normal de compression est réduit car on dépasserait la contrainte admissible de compression du béton.

Les valeurs limites sont les mêmes que calculées en configuration 4.

Le moment à prendre en compte est : $M = M_{fy} - N_{xx}\left(d - \frac{h}{2}\right) = 101\,200\,\text{Nm}$

Nous sommes donc dans le cas où $M \leqslant M_{\lim}$. Ainsi, seuls des aciers tendus sont nécessaires.

Le moment réduit de service est égal à : $\mu = n\,\frac{M}{d^2\,\sigma_s} = 0.149/0.149/0.207$

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Le coefficient α est solution de l'équation : $\alpha^3-3\alpha^2-6\mu(1-\alpha)=0$
Par résolution itérative, on obtient : $\alpha=0.442/0.442/0.499$

La section d'acier nécessaire est égale à :
$$A_{SXS}=\frac{M}{\sigma_s d\left(1-\frac{\alpha}{3}\right)}+\frac{N_{xx}}{\sigma_s}=18.044/18.044/18.47\,\text{cm}^2/\text{m}$$

2.2.7 Configuration 7

La plaque est soumise à un moment de flexion suivant X (autour de l'axe Y) égal à $M_{fy}=-100\,000\,\text{Nm}$ et à un effort de traction égal à $N_{xx}=-100\,000\,\text{N}$ suivant X.

Le moment à reprendre est $M=|M_{fy}|-N_{xx}\left(d-\frac{h}{2}\right)=94\,000\,\text{Nm}$ pour les modélisations A/B/C

Le moment à reprendre est $M=|M_{fy}|-N_{xx}\left(d-\frac{h}{2}\right)=92\,000\,\text{Nm}$ pour les modélisations D avec $d=h-c_{\text{sup}}$ car $M_{fy}<0$:
La section est donc partiellement tendue.

A l'ELU : (les valeurs sont données dans l'ordre « utilisateur » / BAEL/ Eurocode 2(C) /Eurocode 2(D))
Le moment ultime réduit $\mu=\frac{M}{d^2\sigma_b}=0.157/0.185/0.157/0.079$.
La position relative de la fibre neutre $\alpha=1-\sqrt{1-2\mu}=0.172/0.206/0.172/0.0828$.
Le bras de levier réduit $z=d\left(1-\frac{\alpha}{2}\right)=0.146/0.143/0.146/0.173$.

La section d'armature est donc égale à $A_{SXS}=\frac{M}{z\sigma_s}+\frac{N_{xx}}{\sigma_s}=17.079/17.368/17.085/14.563\,\text{cm}^2/\text{m}$
(lit X supérieur).

A l'ELS : (les valeurs sont données dans l'ordre « utilisateur » / BAEL/ Eurocode 2(C) /Eurocode 2(D))

Les valeurs limites sont les mêmes que calculées en configuration 4.
Nous sommes dans le cas où $M\leqslant M_{\text{lim}}$. Ainsi, seuls des aciers tendus sont nécessaires.
Le moment réduit de service est égal à : $\mu=n\frac{M}{d^2\sigma_s}=0.139/0.139/0.193/0.149$
Le coefficient α est solution de l'équation : $\alpha^3-3\alpha^2-6\mu(1-\alpha)=0$
Par résolution itérative, on obtient : $\alpha=0.430/0.430/0.486/0.442$
La section d'acier nécessaire est égale à :
$$A_{SXS}=\frac{M}{\sigma_s d\left(1-\frac{\alpha}{3}\right)}+\frac{N_{xx}}{\sigma_s}=19.642/19.642/20.028/17.484\,\text{cm}^2/\text{m}$$

2.2.8 Configuration 8

La plaque est soumise à un moment de flexion suivant X (autour de l'axe Y) égal à $M_{fy}=-100\,000\,\text{Nm}$ et à un effort de traction égal à $N_{xx}=-2\,000\,000\,\text{N}$ suivant X.

La section est totalement tendue $M=|M_{fy}|-N_{xx}\left(d-\frac{h}{2}\right)=-20\,000\,\text{Nm}<0$ pour les modélisations A/B/C

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Le moment à reprendre est $M=|M_{fy}|-N_{xx}(d-\frac{h}{2})=-60\,000\,\mathrm{Nm}$ pour la modélisation D avec $d=h-c_{\mathrm{sup}}$ et $e=c_{\mathrm{sup}}$ car $M_{fy}<0$

A l'ELU : (les valeurs sont données dans l'ordre « utilisateur » / BAEL/ Eurocode 2)
La section d'armature est donc égale à :

$A_{SXS}=\frac{M}{(d-e)\sigma_s}+\frac{N_{xx}}{\sigma_s}=42.146/42.167/42.167/37.375\,\mathrm{cm^2/m}$ (lit X supérieur).

$A_{SXI}=\frac{-M}{(d-e)\sigma_s}=3.831/3.833/3.833/8.625\,\mathrm{cm^2/m}$ (lit X inférieur).

A l'ELS : les valeurs sont identiques pour les 3 codes.
La section d'armature est donc égale à :

$A_{SXS}=\frac{M}{(d-e)\sigma_s}+\frac{N_{xx}}{\sigma_s}=45.833\,\mathrm{cm^2/m}$ (lit X supérieur) pour les modélisations A/B/C

$A_{SXS}=\frac{M}{(d-e)\sigma_s}+\frac{N_{xx}}{\sigma_s}=40.625\,\mathrm{cm^2/m}$ (lit X supérieur) pour la modélisation D

$A_{SXI}=\frac{-M}{(d-e)\sigma_s}=4.167\,\mathrm{cm^2/m}$ (lit X inférieur) pour les modélisations A/B/C

$A_{SXI}=\frac{-M}{(d-e)\sigma_s}=4.062\,\mathrm{cm^2/m}$ (lit X inférieur) pour la modélisation D

2.2.9 Configuration 9

La plaque est soumise à un moment de flexion suivant X (autour de l'axe Y) égal à $M_{fy}=-100\,000\,\mathrm{Nm}$ et à un moment de flexion suivant Y (autour de l'axe X) égal à $M_{fx}=75\,000\,\mathrm{Nm}$.

La section est partiellement tendue.

A l'ELU : (les valeurs sont données dans l'ordre « utilisateur » / BAEL/ Eurocode 2 (C) /Eurocode 2 (D))
La section d'armature suivant X est la même que la configuration 5.
Soit $A_{SXS}=15.83/16.165/15.835/13.383\,\mathrm{cm^2/m}$.

Suivant Y :
pour la modélisation D avec $d=h-c_{\mathrm{inf}}$ car $M_{fx}>0$
Le moment ultime réduit $\mu=\frac{M_{fx}}{d^2\sigma_b}=0.125/0.148/0.125/0.082$.
La position relative de la fibre neutre $\alpha=1-\sqrt{1-2\mu}=0.134/0.161/0.135/0.086$.
Le bras de levier réduit $z=d(1-\frac{\alpha}{2})=0.149/0.147/0.149/0.153$.
La section d'armature est donc égale à $A_{SYS}=\frac{M_{fx}}{z\sigma_s}=11.555/11.723/11.559/11.263\,\mathrm{cm^2/m}$ (lit Y supérieur).

A l'ELS : (les valeurs sont données dans l'ordre « utilisateur » / BAEL/ Eurocode 2 (C) /Eurocode 2 (D))
La section d'armature suivant X est la même que la configuration 5.
Soit $A_{SXS}=18.31/18.31/18.729/16.378\,\mathrm{cm^2/m}$.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Suivant Y :
Les valeurs limites sont les mêmes que calculées en configuration 4.
Nous sommes dans le cas où $M \leqslant M_{\lim}$. Ainsi, seuls des aciers tendus sont nécessaires.

Le moment réduit de service est égal à : $\mu = n \frac{M}{d^2 \sigma_s} = 0.111/0.111/0.154/0.162$

Le coefficient α est solution de l'équation : $\alpha^3 - 3\alpha^2 - 6\mu(1-\alpha) = 0$

Par résolution itérative, on obtient : $\alpha = 0.393/0.393/0.447/0.447$

La section d'acier nécessaire est égale à :

$$A_{SYS} = \frac{M}{\sigma_s d\left(1-\frac{\alpha}{3}\right)} + \frac{N_{xx}}{\sigma_s} = 13.486/13.486/13.771/13.771 \text{ cm²/m}$$

2.2.10 Configuration 10

La plaque est soumise à un moment de flexion suivant Y (autour de l'axe X) égal à $M_{fx} = 150\,000 \text{ Nm}$ à l'ELU et à $M_{fx} = 100\,000 \text{ Nm}$ à l'ELS.

La section est partiellement tendue.

A l'ELU : (les valeurs sont données dans l'ordre « utilisateur » / BAEL/ Eurocode 2)

Le moment ultime réduit $\mu = \frac{M_{fx}}{d^2 \sigma_b} = 0.251/0.295/0.251$.

La position relative de la fibre neutre $\alpha = 1 - \sqrt{1-2\mu} = 0.295/0.360/0.294$.

Le bras de levier réduit $z = d\left(1-\frac{\alpha}{2}\right) = 0.136/0.131/0.136$.

La section d'armature est donc égale à $A_{SYI} = \frac{M_{fx}}{z \sigma_s} = 25.28/26.302/25.285 \text{ cm²/m}$ (lit Y inférieur).

A l'ELS : (les valeurs sont données dans l'ordre « utilisateur » / BAEL/ Eurocode 2)
Le moment de flexion est réduit car on dépasserait la contrainte admissible de compression du béton.
Les valeurs limites sont les mêmes que calculées en configuration 4.
Nous sommes dans le cas où $M \leqslant M_{\lim}$. Ainsi, seuls des aciers tendus sont nécessaires.
La configuration est la même que la configuration 5 mais pour les aciers inférieurs.
La section d'acier nécessaire est donc égale à : $A_{SYI} = 18.31/18.31/18.729 \text{ cm²/m}$

2.2.11 Configuration 11

La plaque est soumise à un moment de flexion suivant Y (autour de l'axe X) égal à $M_{fx} = 260\,000 \text{ Nm}$ pour le calcul à l'eurocode 2 et « utilisateur » et $M_{fx} = 220\,000 \text{ Nm}$ pour le calcul au BAEL. Le calcul n'est fait qu'à l'ELU. (les valeurs sont données dans l'ordre « utilisateur » / BAEL/ Eurocode 2).

La section est partiellement tendue.

Le moment ultime réduit $\mu = \frac{M_{fx}}{d^2 \sigma_b} = 0.435/0.433/0.435$.

La position relative de la fibre neutre $\alpha = 1 - \sqrt{1-2\mu} = 0.642/0.635/0.64$.

Le bras de levier réduit $z = d\left(1-\frac{\alpha}{2}\right) = 0.109/0.109/0.109$.

La section d'armature est donc égale à $A_{SYI} = \frac{M_{fx}}{z E_A \varepsilon_A} = 55.014/46.329/54.971 \text{ cm²/m}$ (lit Y inférieur).

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2.2.12 Configuration 12

La plaque est soumise à un moment de flexion suivant Y (autour de l'axe X) égal à $M_{fx}=380\,000\,\mathrm{Nm}$. Le calcul n'est fait qu'à l'ELU.

Le moment ultime réduit $\mu=\frac{M_{fx}}{d^2\sigma_b}=0.63>0.48$. Les aciers sont complètement comprimés, les sections d'aciers sont mises à -1. Attention, dans ce cas, certaines facettes de Capra-Maury sont partiellement tendues (voir R7.04.05).

2.2.13 Configuration 13

La plaque est soumise à une compression de $N_{yy}=1\,500\,000\,\mathrm{N}$ et à un effort tranchant $Q_y=8\,00\,000\,\mathrm{N}$.

Ferraillage longitudinal :
ELU : -1 (Pivot C non calculé, toutes les facettes sont comprimées)

Ferraillage transversal :
Pour les codes « utilisateur » et BAEL, seul l'effort tranchant est pris en compte :

$$A_{ST}=\frac{\sqrt{Q_x^2+Q_y^2}}{z(\cot\theta+\cot\alpha)\sin\alpha\,\sigma_s}=\frac{\sqrt{Q_x^2+Q_y^2}}{z\,\sigma_s}=127.714/153.333\,\mathrm{cm^2/m^2}$$

où $\alpha=90°$ et $\theta=45°$ et $z=0.9(h-c)$ (UTILISATEUR) et $z=h-2c$ (BAEL)

A l'Eurocode 2, le calcul du ferraillage transversal est différent, il tient compte de l'effort normal de compression :
$Q_{max}=800000\,N$
L'effort normal correspondant à cette section ($\theta=\frac{-\pi}{2}$) est de $N=N_{yy}\sin(\theta)^2=1500000\,N$.

$\sigma_{cp}=\frac{N}{h}>0$ On a donc $\frac{\sigma_{cp}}{\sigma_b}=0{,}321>0{,}25$ donc $\alpha_{cc}=1{,}25$

$v_1=0.6\left(1-\frac{f_{ck}}{250}\right)=0.516$ et donc $X=\frac{Q_{max}}{zv_1\alpha_{cc}}=0.443$ et comme $X\geq 0.3448$: $\cot\theta=1.652$

$A_{ST}=\frac{Q_{max}}{zcot\,\theta\,\sigma_s}=92.801\,\mathrm{cm^2/m^2}$ avec $z=h-2c$

2.2.14 Configuration 14

La plaque est soumise à une compression de $N_{yy}=2\,500\,000\,\mathrm{N}$ et à un effort tranchant $Q_y=100\,000\,\mathrm{N}$.

Ferraillage longitudinal :
ELU : -1 (Pivot C non calculé, toutes les facettes sont comprimées)

Ferraillage transversal :
Pour les codes « utilisateur » et BAEL, seul l'effort tranchant est pris en compte :

$$A_{ST}=\frac{\sqrt{Q_x^2+Q_y^2}}{z(\cot\theta+\cot\alpha)\sin\alpha\,\sigma_s}=\frac{\sqrt{Q_x^2+Q_y^2}}{z\,\sigma_s}=15.964/19.167\,\mathrm{cm^2/m^2}$$

où $\alpha=90°$ et $\theta=45°$ et $z=0.9(h-c)$ (UTILISATEUR) et $z=h-2c$ (BAEL)

A l'Eurocode 2, le calcul du ferraillage transversal est différent, il tient compte de l'effort normal de compression :

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

$Q_{max}=800000\,N$

L'effort normal correspondant à cette section ($\theta=\frac{-\pi}{2}$) est de $N=N_{yy}\sin(\theta)^2=1500000\,N$.

$\sigma_{cp}=\frac{N}{h}>0$ On a donc $\frac{\sigma_{cp}}{\sigma_b}=0,535>0,5$ donc $\alpha_{cc}=2,5\left(1-\frac{\sigma_{cp}}{\sigma_b}\right)=1,161$

$v_1=0.6\left(1-\frac{f_{ck}}{250}\right)=0.516$ et donc $X=\frac{Q_{max}}{zv_1\alpha_{cc}}=0.059$ et comme $X\leq 0.3448$: $\cot\theta=2.5$

$A_{ST}=\frac{Q_{max}}{zcot\,\theta\sigma_s}=7.667\,\text{cm}^2/\text{m}^2$ avec $z=h-2c$

2.3 Incertitudes sur la solution

Aucune.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

On utilise une modélisation DKT. On utilise la codification « UTILISATEUR ».

3.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage contient 1 élément de type QUAD4.

3.3 Grandeurs testées et résultats

Configuration	État Limite considéré	Identification	Type de référence	Valeur de référence cm²/m	Erreur relative
1	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNST	'ANALYTIQUE'	15.964	0.001
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
2	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	11.494	0.002
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	11.494	0.002
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNST	'ANALYTIQUE'	95.785	0.004
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	12.5	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	12.5	0
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
3	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	11.494	0.002
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	11.494	0.002
	ELU	DNST	'ANALYTIQUE'	13.164	0.003
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	12.5	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	12.5	0

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	15.83	0.001
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	18.31	0.001
5	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	15.83	0.001
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	18.31	0.001
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
6	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	14.596	0.003
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	18.044	0.002
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
7	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	17.079	0.0004
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	19.642	0.0001
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
8	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	3.831	0.011
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	42.146	0.0009
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	4.167	0.008
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	45.833	0.0007
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

9	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	15.83	0.001
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	11.555	0.002
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	18.31	0.001
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	13.486	0.003
10	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	25.28	0.001
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	18.31	0.001
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
11	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	55.014	0.001
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
12	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	-1	-1
13	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNST	'ANALYTIQUE'	127.714	0.001
14	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNST	'ANALYTIQUE'	15.964	0.001

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

On utilise une modélisation DKT. On utilise la codification « BAEL ».

4.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage contient 1 élément de type QUAD4.

4.3 Grandeurs testées et résultats

Configuration	État Limite considéré	Identification	Type de référence	Valeur de référence cm^2/m	Erreur relative
1	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNST	'ANALYTIQUE'	15.972	0.001
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
2	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	11.5	0.002
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	11.5	0.002
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNST	'ANALYTIQUE'	95,833	0.004
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	12.5	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	12.5	0
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
3	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	11.5	0.002
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	11.5	0.002
	ELU	DNST	'ANALYTIQUE'	13,171	0.003
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	12.5	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	12.5	0
4	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	16.165	0.001
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	18.31	0.001
5	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	16.165	0.001
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	18.31	0.001
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
6	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	14.984	0.003
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	18.044	0.002
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
7	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	17.368	0.0004
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	19.642	0.0001
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
8	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	3.833	0.011
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	42.167	0.0009
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	4.167	0.008
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	45.833	0.0007

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
9	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	16.165	0.001
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	11.723	0.002
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	18.31	0.001
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	13.486	0.003
10	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	26.302	0.001
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	18.31	0.001
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
11	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	-1	-1
12	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	-1	-1
13	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNST	'ANALYTIQUE'	127,777	0.001
14	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNST	'ANALYTIQUE'	15,972	0.001

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

5 Modélisation C

5.1 Caractéristiques de la modélisation

On utilise une modélisation DKT. On utilise la codification « EC2 ».

5.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage contient 1 élément de type QUAD4.

5.3 Grandeurs testées et résultats

Configuration	État Limite considéré	Identification	Type de référence	Valeur de référence cm²/m	Erreur relative
1	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNST	'ANALYTIQUE'	6.388	0.001
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
2	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	11.5	0.002
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	11.5	0.002
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNST	'ANALYTIQUE'	38,524	0.004
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	12.5	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	12.5	0
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
3	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	11.5	0.002
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	11.5	0.002
	ELU	DNST	'ANALYTIQUE'	5,268	0.003
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	12.5	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	12.5	0

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	15.835	0.001
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	18.729	0.001
5	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	15.835	0.001
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	18.729	0.001
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
6	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	14.601	0.003
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	18.47	0.002
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
7	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	17.085	0.0004
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	20.028	0.0001
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
8	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	3.833	0.011
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	42.167	0.0009
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	4.167	0.008
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	45.833	0.0007
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

9	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	15.835	0.001
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	11.559	0.002
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	18.729	0.001
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	13.771	0.003
10	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	25.285	0.001
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	18.729	0.001
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
11	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	54.971	0.001
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
12	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	-1	-1
13	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNST	'ANALYTIQUE'	56,336	0.001
14	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	-1	-1
	ELU	DNST	'ANALYTIQUE'	6,388	0.001

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

6 Modélisation D

6.1 Caractéristiques de la modélisation

On utilise une modélisation DKT. On utilise la codification « EC2 ».

6.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage contient 1 élément de type QUAD4.

6.3 Grandeurs testées et résultats

Configuration	État Limite considéré	Identification	Type de référence	Valeur de référence cm^2/m	Erreur relative
1	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	11.5	0.001
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	11.5	0.001
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNST	'ANALYTIQUE'	38.333	0.001
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	12.5	0.001
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	12.5	0.001
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
2	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	15,260	0.001
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNST	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	18,729	0.001
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
3	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	16,588	0.001
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNST	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	20,028	0.001
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	3,833	0.001
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	42,166	0.001
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	4,166	0.001
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	45,833	0.001
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
5	ELU	DNSXI	'ANALYTIQUE'	15,260	0.001
	ELU	DNSXS	'ANALYTIQUE'	9,915	0.001
	ELU	DNSYI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELU	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXI	'ANALYTIQUE'	0	0
	ELS	DNSXS	'ANALYTIQUE'	18,729	0.001
	ELS	DNSYI	'ANALYTIQUE'	12,057	0.001
	ELS	DNSYS	'ANALYTIQUE'	0	0

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

7 Synthèse des résultats

Ce test permet de mettre en évidence la validité des calculs de densité de ferraillage sur des cas simples.
Les résultats obtenus avec le modèle sont en effet conformes aux valeurs déterminées de façon analytique.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)