

Chapitre Premier

Généralités sur l'Interaction Sol-Structure (I.S.S)

- ❑ *Définition de l'I.S.S*
- ❑ *Modélisation de l'I.S.S*
- ❑ *Formulation de l'I.S.S*
- ❑ *Outils d'analyse*
- ❑ *Exemples de calcul*
- ❑ *Travail personnel*



Pont Sidi-Rached, Constantine – Photo H. Benouis (FB 2022)

DÉFINITION DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE



□ Définition de l'Interaction Sol-Structure

- **Disciplines fondamentales : Connaissances de base**

Pour traiter un problème d'Interaction Sol-Structure, il faut résoudre les problèmes suivants :

- Définition de l'aléa sismique et du mouvement résultant

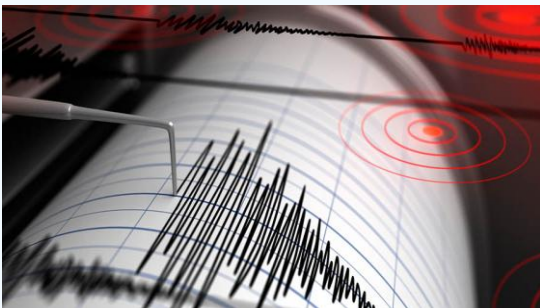
→ *Sismologie de l'ingénieur*

- Étude du comportement du sol sous chargement cyclique

→ *Dynamique des sols*

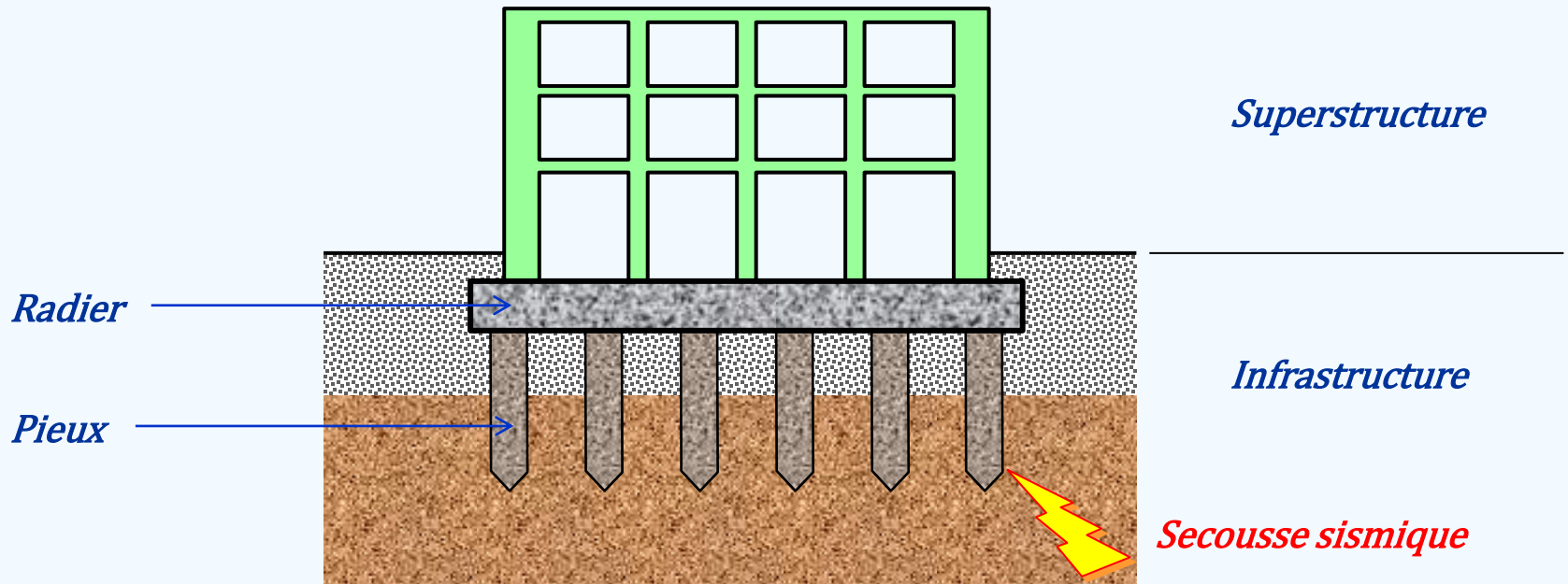
- Évaluation de la réponse de l'ouvrage sous chargement dynamique

→ *Dynamique des structures*



□ Définition de l'Interaction Sol-Structure

- **Sols et ouvrages en interaction** : Mode de transmission des ondes sismiques

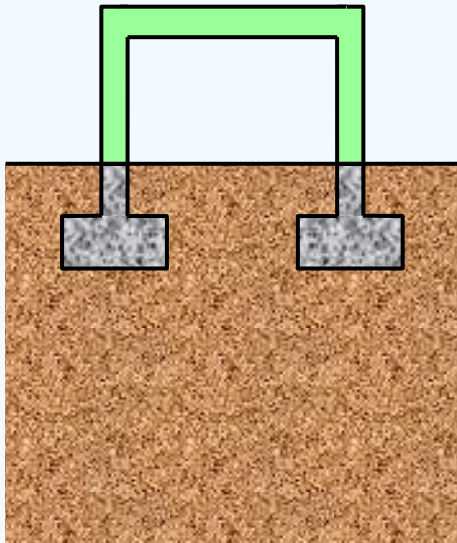


Sous séisme, les ondes sismiques se propagent dans le sol et se transmettent à l'ouvrage par l'intermédiaire de sa fondation. Celui-ci se met à vibrer et retransmet des efforts dynamiques au sol toujours par le biais de sa fondation.

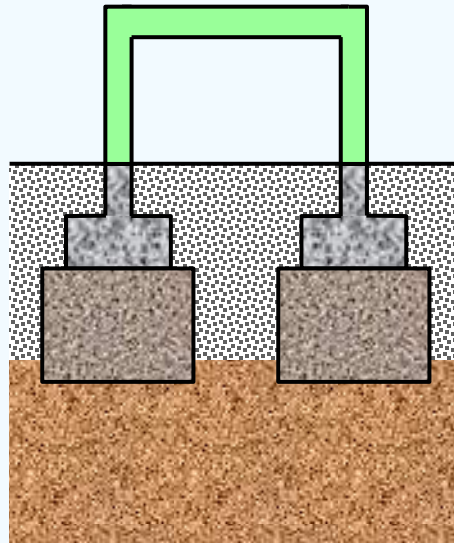
⇒ Cette réaction mutuelle s'appelle : **I.S.S** « Interaction Sol-Structure »

□ Définition de l'Interaction Sol-Structure

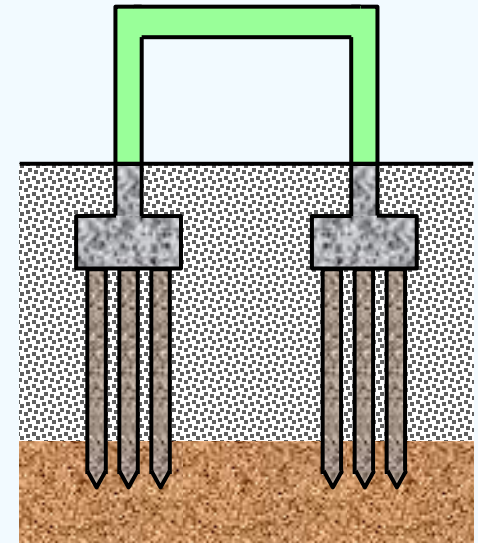
- **Sols et ouvrages en interaction** : Types de fondations des ouvrages



Fondations superficielles
(Semelles ou Radier)



Fondations semi-profondes
(Puits)

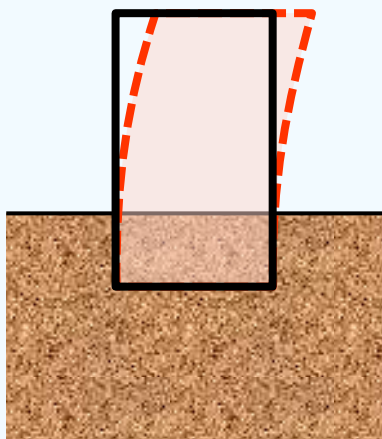


Fondations profondes
(Pieux)

Nota : Dans les calculs classiques (Calculs sans I.S.S), les ouvrages sont considérés comme encastrés à leur base et les propriétés du sol de fondation ne sont pas prises en compte dans le calcul de la superstructure.

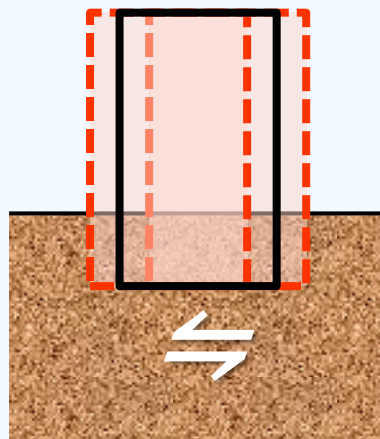
□ Définition de l'Interaction Sol-Structure

- **Sols et ouvrages en interaction : Modes d'Interaction Sol-Structure**

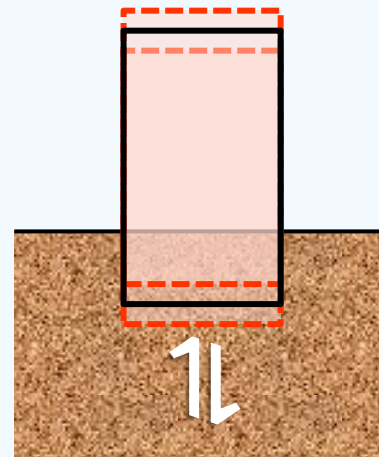


*Encastrement
parfait*

Calculs sans I.S.S

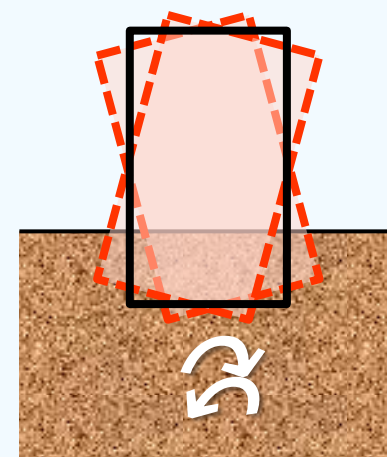


*Glissement
(Tamis)*



*Poinçonnement
(Pompage)*

Calculs avec I.S.S



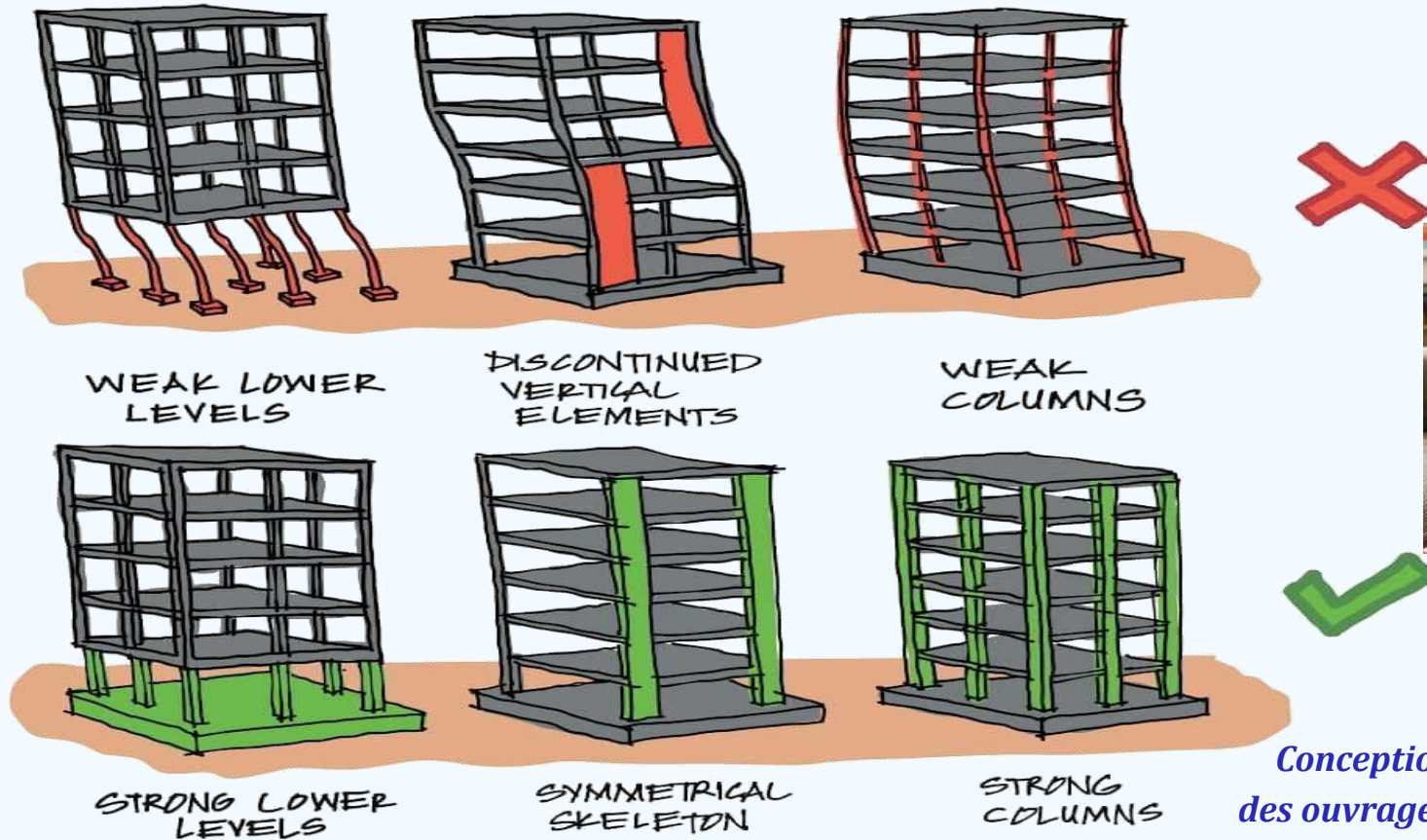
*Balancement
(Roulis)*

Nota : Dans les calculs où l'on prend en compte les propriétés du sol de fondation, on tient en compte d'une certaine façon l'interaction entre le sol et la base de l'ouvrage.

□ Définition de l'Interaction Sol-Structure

- **Comportement des ouvrages en interaction avec les sols sous séisme**

EARTHQUAKE RESISTANT DESIGN



*Conception parasismique
des ouvrages en interaction
avec le sol de leurs fondations*

07SKETCHES.CO

□ Définition de l'Interaction Sol-Structure

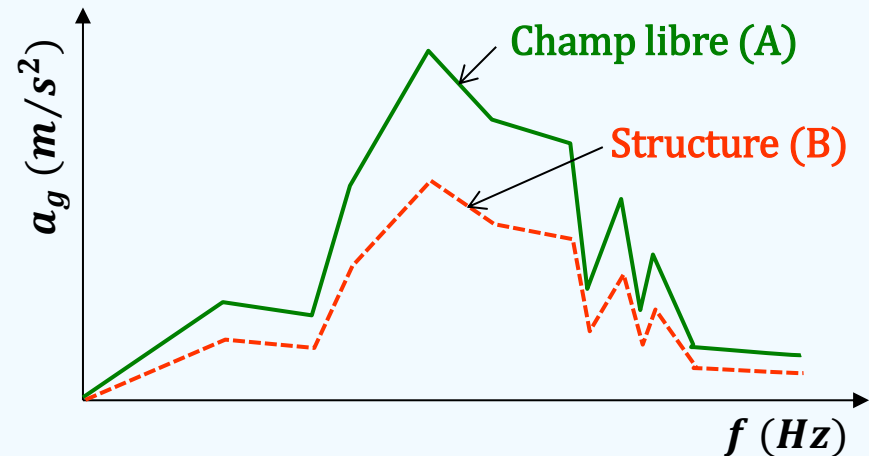
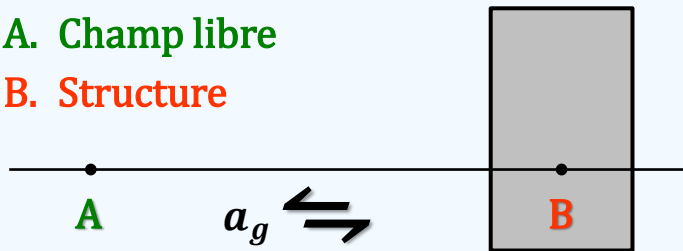
- **Prise en compte de l'Interaction Sol-Structure**

Une secousse sismique en champ libre est définie par un accélérogramme mesurant l'accélération $a_g(t)$ à la surface du sol en l'absence de tout ouvrage (**Champ libre**).

En présence d'un ouvrage, les mouvements au voisinage des fondations peuvent donc différer de ceux existant en champ libre (**Structure**).

A. Champ libre

B. Structure



L'interaction sol-structure traduit la modification du mouvement du sol en présence d'un ouvrage. Cette interaction est plus ou moins importante selon le type de sol, les caractéristiques de l'ouvrage et son mode de vibration.

□ Définition de l'Interaction Sol-Structure

- **Types d'Interaction Sol-Structure**

On distingue deux types d'interaction sol-structure :

- L'interaction cinématique qui résulte de la **différence des raideurs**.
- L'interaction inertielle qui résulte de la **différence des masses**.

L'interaction prépondérante résulte généralement du chargement inertiel ;
l'interaction cinématique étant généralement négligeable.

La plupart des règlements de calcul parasismiques ne tiennent pas compte de l'interaction cinématique dont les effets sont plus difficiles à évaluer rigoureusement que les effets inertiels.

Ces deux types d'interaction sont fonction des caractéristiques de la fondation et de la nature des ondes sismiques.

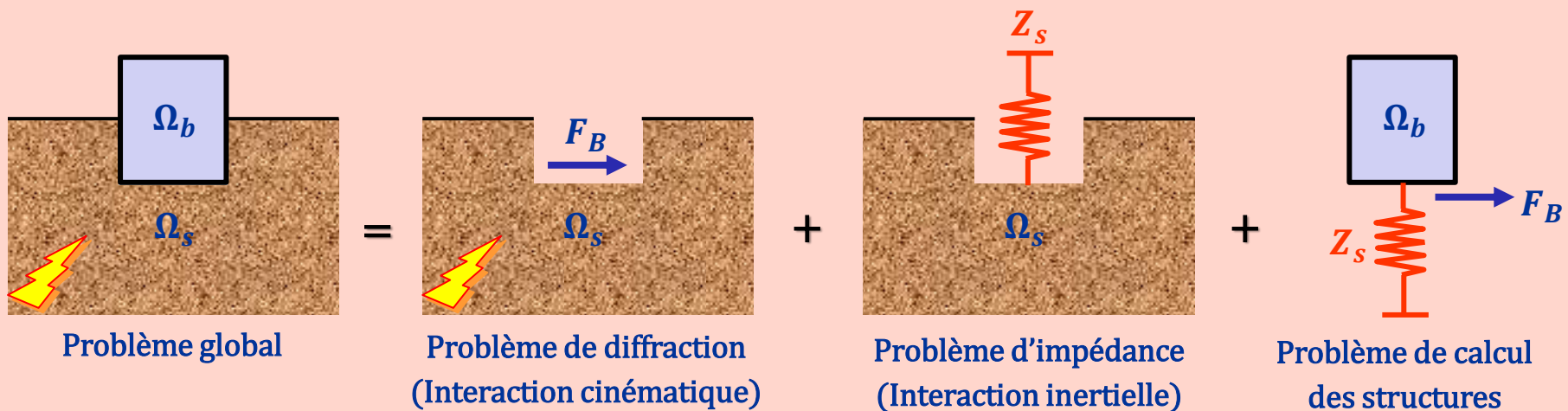
La réponse de la structure est obtenue en résolvant les trois étapes successives illustrées sur la figure ci-après conformément au **principe de superposition de Kausel et al. (1978)**.

□ Définition de l'Interaction Sol-Structure

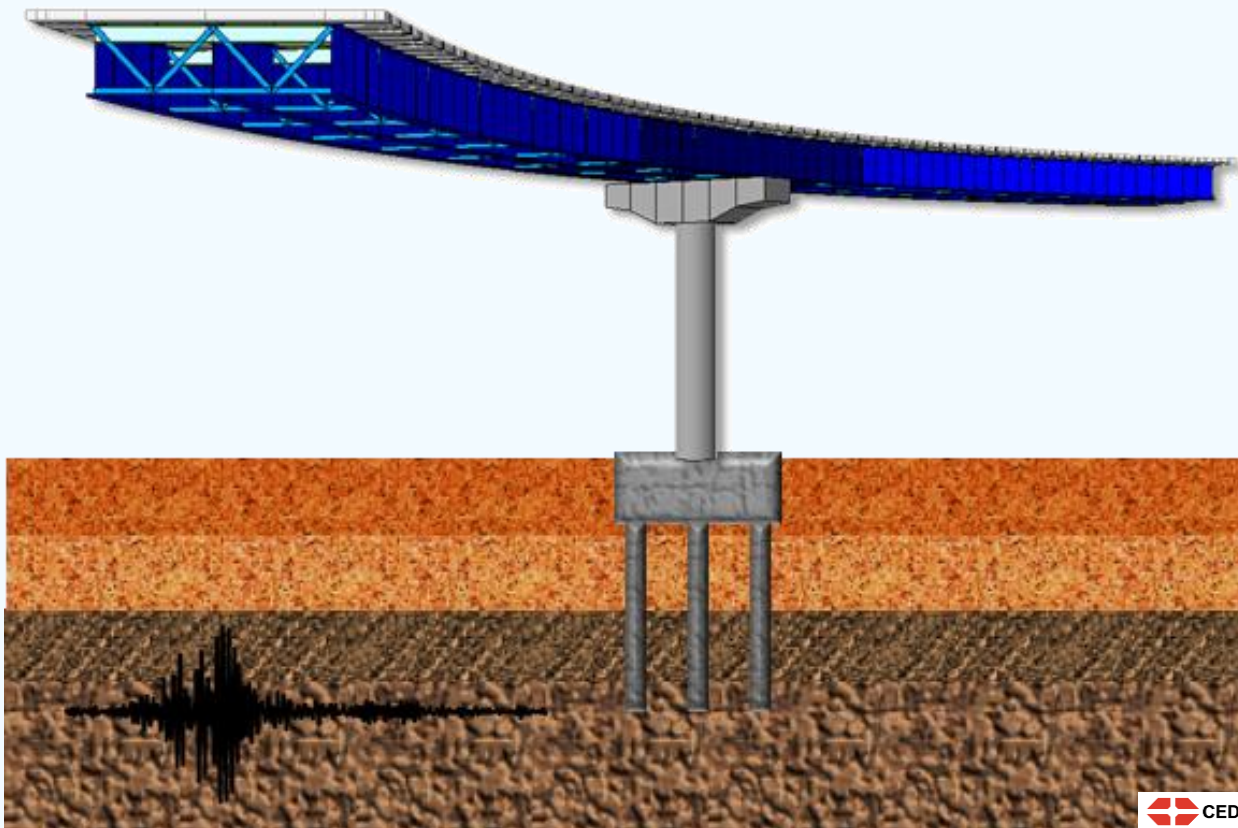
• **Types d'Interaction Sol-Structure**

Le principe de Kausel et al. (1978) est basé sur les étapes de calcul suivantes :

- I. Evaluation du mouvement du sol en champ libre et de ses propriétés correspondantes à appliquer à la base de l'ouvrage (**Interaction cinématique**).
- II. Evaluation des impédances d'une fondation rigide sans masse représentative de l'empreinte de la structure dans le sol (**Interaction inertielle**).
- III. Analyse de la réponse de la structure reposant sur un système de ressorts et d'amortisseurs déduits des matrices d'impédances (**Calcul des structures**).



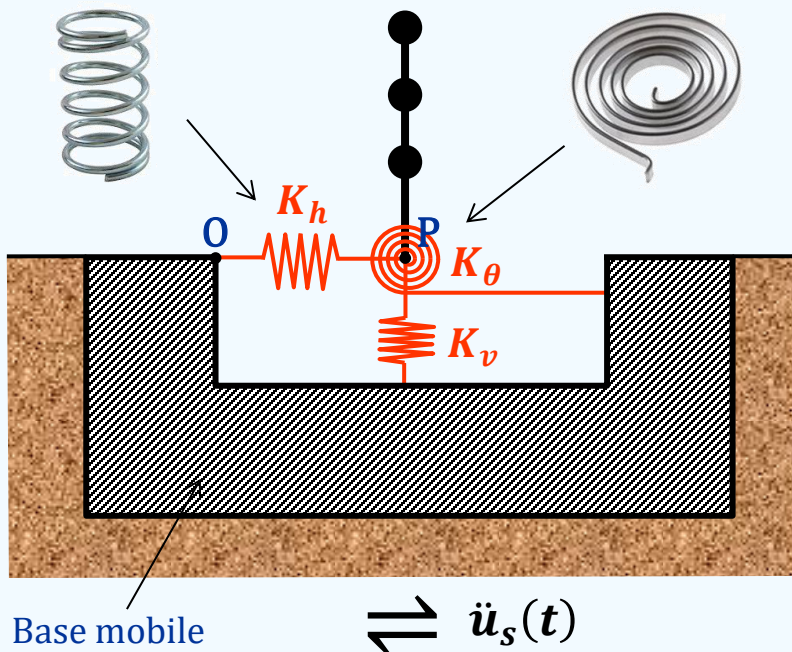
MODÉLISATION DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE



□ Modélisation de l'Interaction Sol-Structure

L'interaction entre le sol de fondation et la structure peut être mise en évidence par un modèle simple :

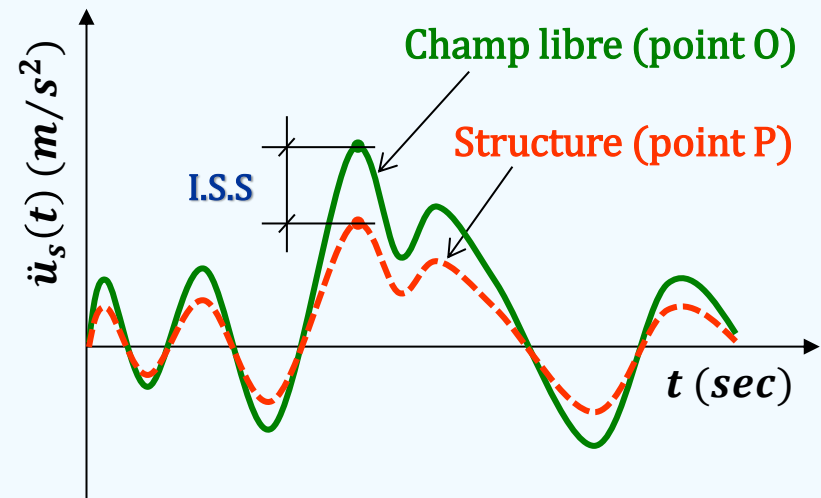
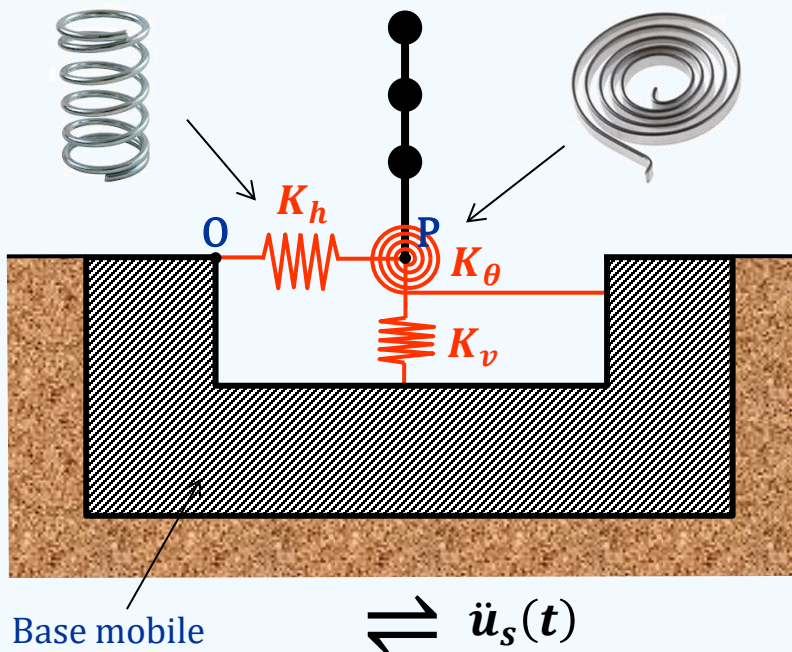
- La structure (Bâtiment, Château d'eau, ...) est représentée par une console.
- Le sol de fondation est représenté par des ressorts agissant à la translation ou à la rotation et reliés à une base mobile.



□ Modélisation de l'Interaction Sol-Structure

L'interaction entre le sol de fondation et la structure peut être mise en évidence par un modèle simple :

- La structure (Bâtiment, Château d'eau, ...) est représentée par une console.
- Le sol de fondation est représenté par des ressorts agissant à la translation ou à la rotation et reliés à une base mobile.

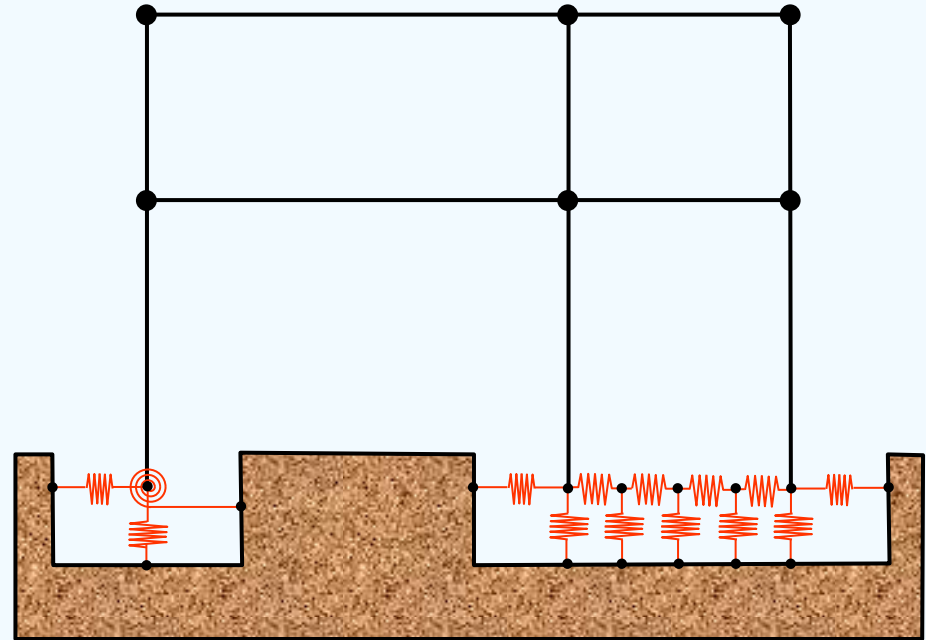
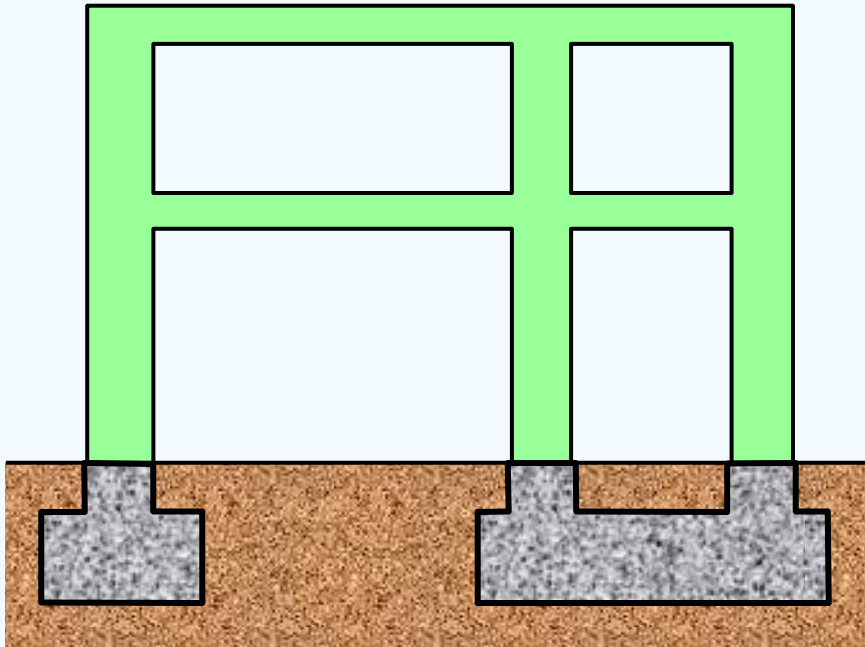


Remarque : L'I.S.S correspondant au mouvement relatif du point P par rapport au point O dépend de la masse de la structure et de la raideur des ressorts qui représentent le sol.

□ Modélisation de l'Interaction Sol-Structure

Dans les cas les plus complexes, on est amené à concevoir des modèles dans lesquels le sol est représenté par des ressorts ou par des éléments finis.

- *Modélisation par des ressorts*

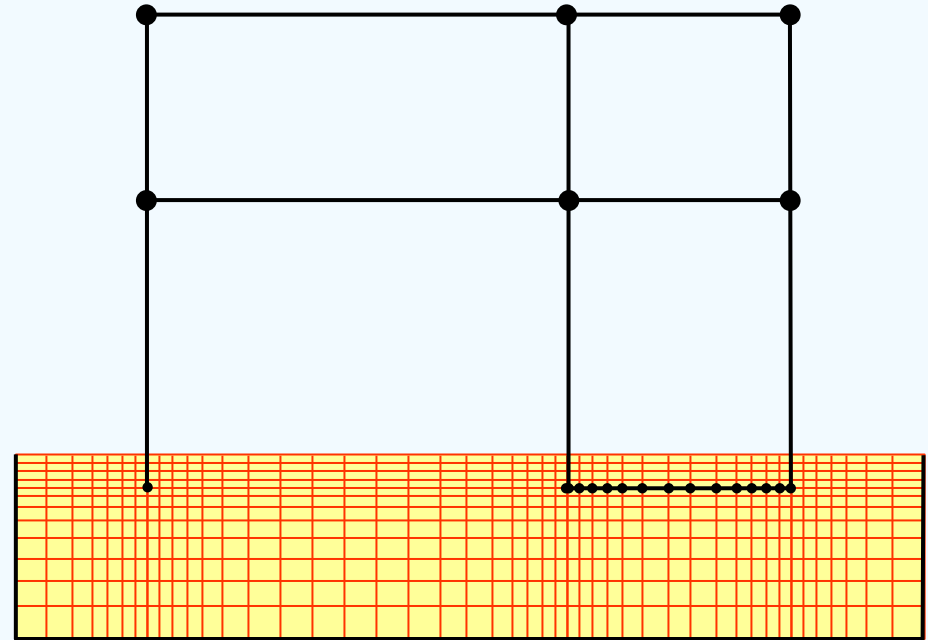
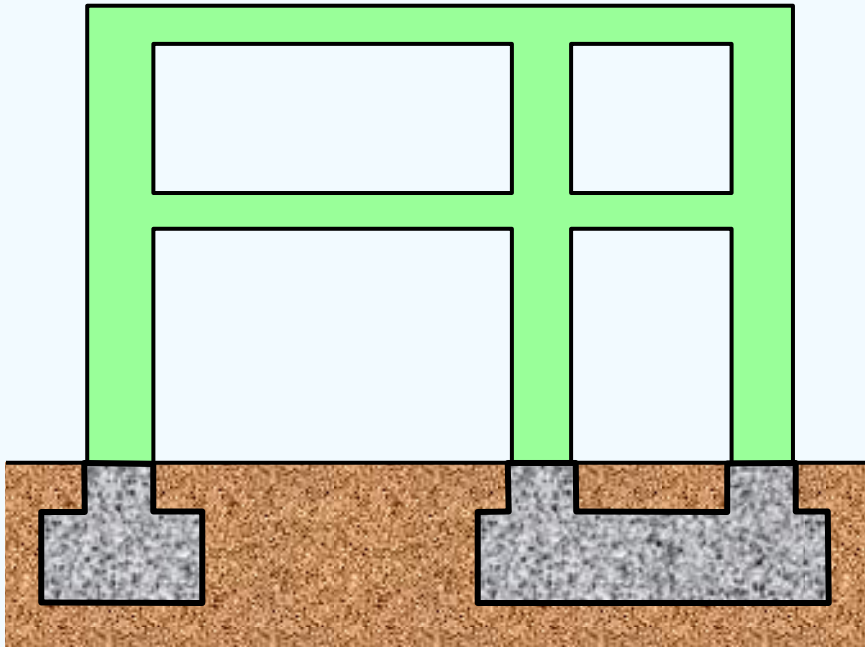


- *Logiciels de calculs* : SAP2000, ROBOT, ...

□ Modélisation de l'Interaction Sol-Structure

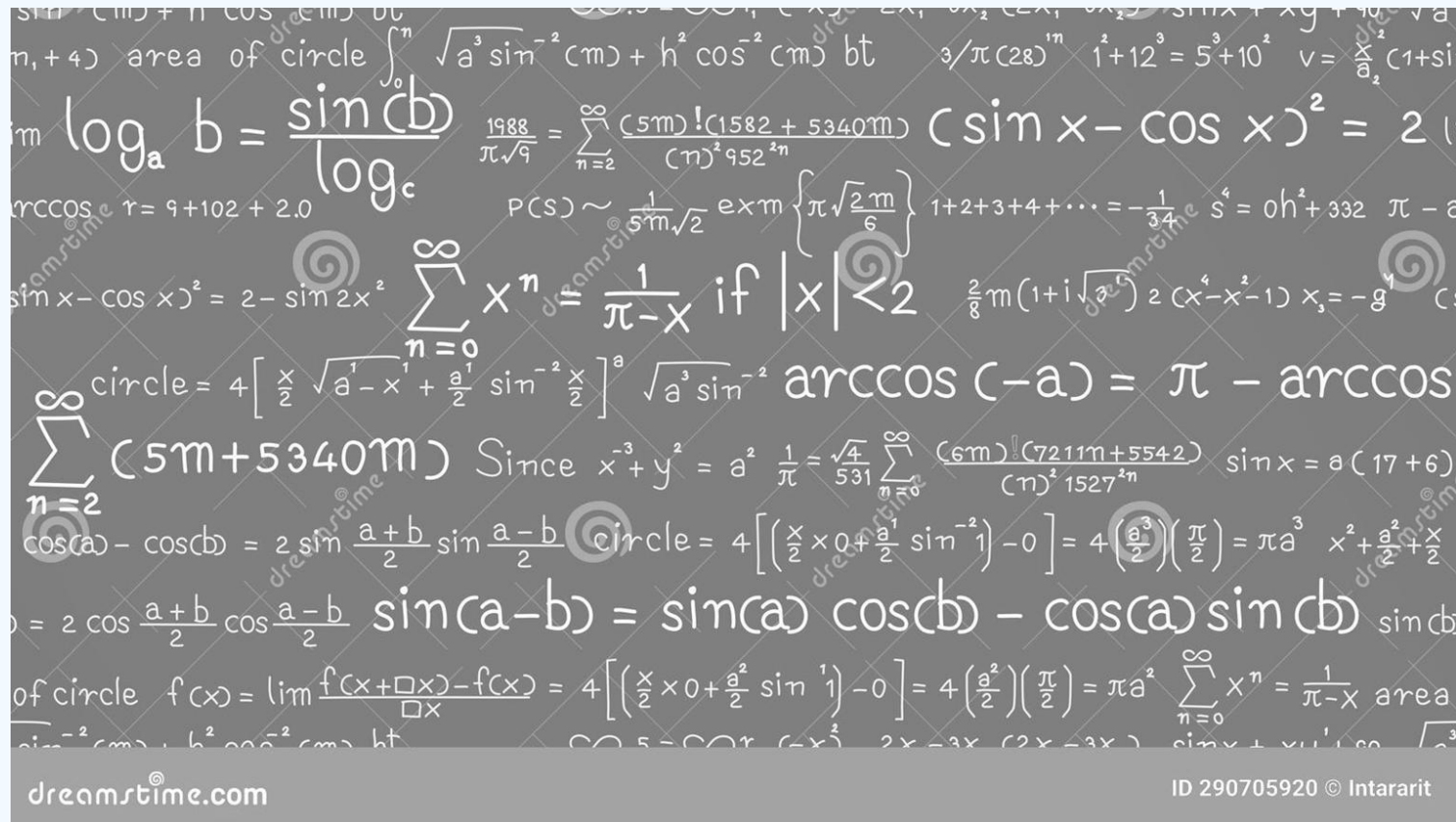
Dans les cas les plus complexes, on est amené à concevoir des modèles dans lesquels le sol est représenté par des ressorts ou par des éléments finis.

- Modélisation par des éléments finis



- Logiciels de calculs : SAP2000, ROBOT, PLAXIS, FLAC, OPTUM-CE, ...

FORMULATION DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE



Formulation de l'Interaction Sol-Structure

- Problème d'interaction (Système sol-structure)

$$\bar{M}\ddot{u} + \bar{C}\dot{u} + \bar{K}u = \bar{Q}_f$$

- Solution de champ libre (Sol seul)

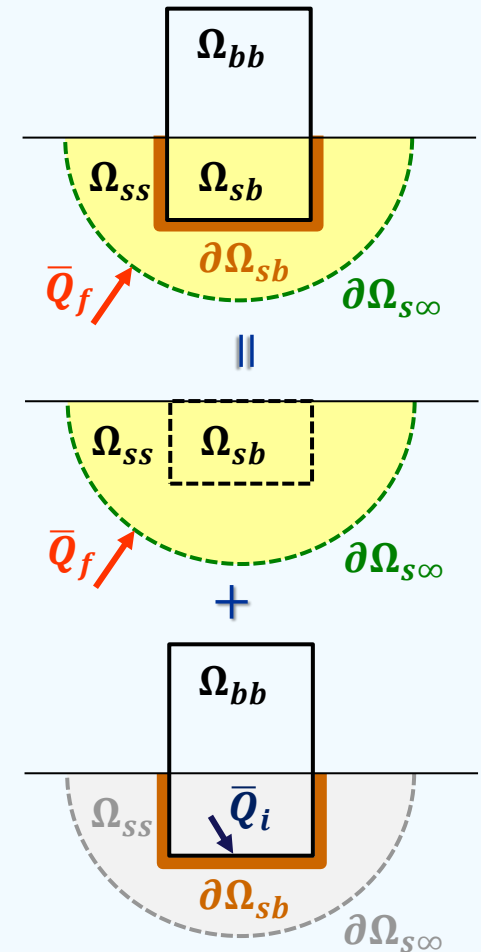
$$\bar{M}_s\ddot{u}_f + \bar{C}_s\dot{u}_f + \bar{K}_s u_f = \bar{Q}_f$$

- Solution d'un problème source (Réaction de la structure)

$$\bar{M}\ddot{u}_i + \bar{C}\dot{u}_i + \bar{K}u_i = -\bar{Q}_i \quad | \quad u_i = u - u_f$$

D'où finalement :

$$\bar{Q}_i = (\bar{M} - \bar{M}_s)\ddot{u}_f + (\bar{C} - \bar{C}_s)\dot{u}_f + (\bar{K} - \bar{K}_s)u_f$$



Formulation de l'Interaction Sol-Structure

Si l'on néglige l'amortissement (pour simplifier), on aura :

$$\bar{Q}_i = (\bar{M} - \bar{M}_s)\ddot{u}_f + (\bar{K} - \bar{K}_s)\bar{u}_f$$

Il y a interaction dès qu'il existe entre le sol et la structure :

a/ une différence de masse ($\bar{M} \neq \bar{M}_s$)

Si $\bar{K} = \bar{K}_s \Rightarrow \bar{Q}_{ii} = (\bar{M} - \bar{M}_s)\ddot{u}_f$

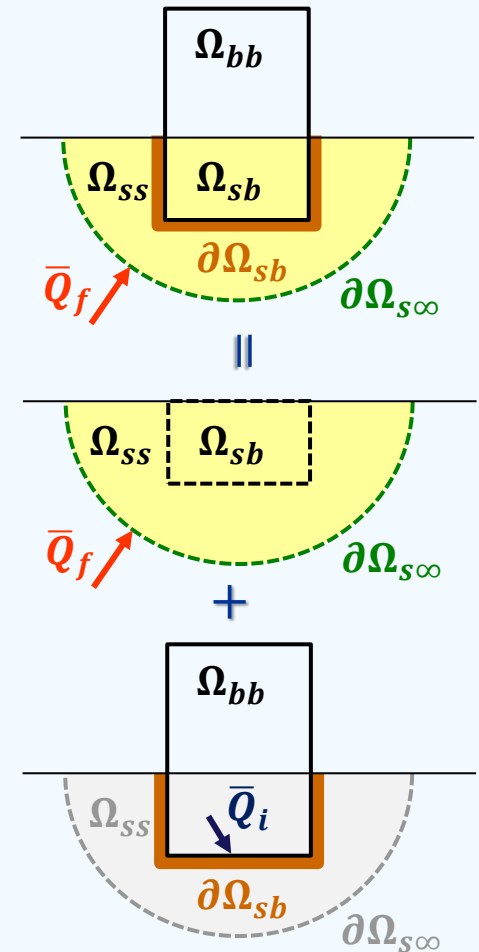
↪ C'est l'interaction inertielle liée à la différence de masse entre le sol et la structure

b/ une différence de raideur ($\bar{K} \neq \bar{K}_s$)

Si $\bar{M} = \bar{M}_s \Rightarrow \bar{Q}_{ic} = (\bar{K} - \bar{K}_s)\bar{u}_f$

↪ C'est l'interaction cinématique liée à la différence de raideur entre le sol et la structure

Nota : L'interaction inertielle est la plus prépondérante.

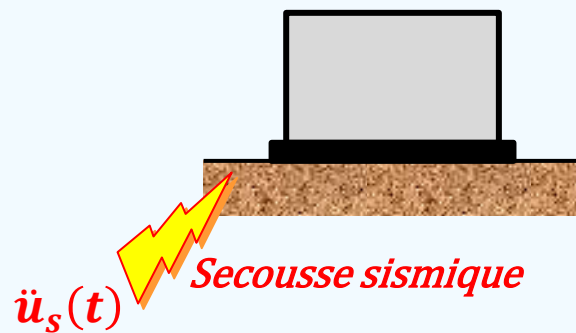


Formulation de l'Interaction Sol-Structure

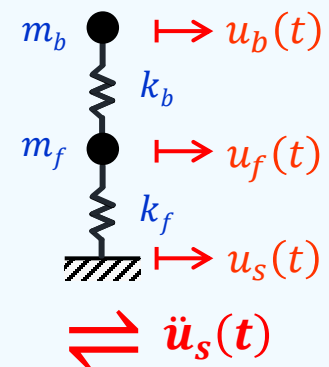
Cas simple d'Interaction Sol-Structure

Données du problème

Structure posée au niveau de la surface du sol



Structure



Modèle

tels que :

m_b – masse de la structure

k_b – raideur de la structure

u_b – déplacement de la structure

m_f – masse de la fondation

k_f – raideur de la fondation

u_f – déplacement de la fondation

$u_s(t)$ – déplacement du sol en champ libre

$\ddot{u}_s(t)$ – accélération sismique en champ libre (au niveau du sol)

Formulation de l'Interaction Sol-Structure

- Cas simple d'Interaction Sol-Structure

• Solution du problème

L'équation générale d'équilibre est égale à : $\bar{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{u}} + \bar{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{u}} + \bar{\mathbf{K}}\mathbf{u} = \bar{\mathbf{Q}}_s$

Si l'on néglige l'amortissement ($\bar{\mathbf{C}} = \bar{\mathbf{0}}$), on aura : $\bar{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{u}} + \bar{\mathbf{K}}\mathbf{u} = \bar{\mathbf{Q}}_s$

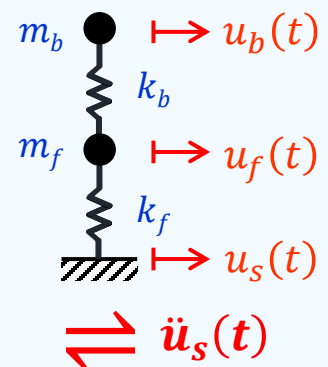
avec : $\bar{\mathbf{M}} = \begin{pmatrix} m_b & 0 \\ 0 & m_f \end{pmatrix}$; $\bar{\mathbf{K}} = \begin{pmatrix} k_b & -k_b \\ -k_b & k_b + k_f \end{pmatrix}$; $\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u_b \\ u_f \end{Bmatrix}$; $\bar{\mathbf{Q}}_s = \begin{Bmatrix} 0 \\ k_f u_s \end{Bmatrix}$

D'où : $\begin{pmatrix} m_b & 0 \\ 0 & m_f \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_b \\ \ddot{u}_f \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} k_b & -k_b \\ -k_b & k_b + k_f \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_b \\ u_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ k_f u_s \end{Bmatrix}$

$$\Rightarrow \begin{cases} m_b \ddot{u}_b + k_b(u_b - u_f) = 0 \\ m_f \ddot{u}_f - k_b(u_b - u_f) + k_f(u_f - u_s) = 0 \end{cases}$$

↪ Terme dû à l'effet du sol sur la fondation

↪ Terme dû à l'effet de la structure sur la fondation



[illegible]

□ Outils d'analyse

Calcul des ouvrages géotechniques à l'aide de logiciels spécialisés tels que :

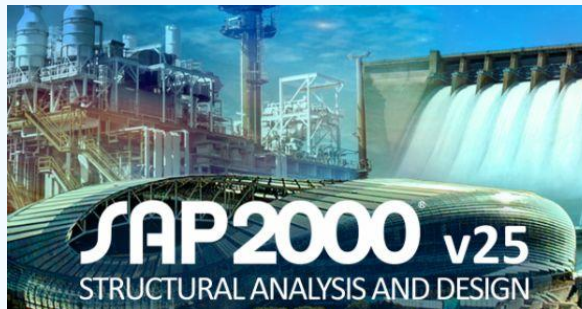
- **FLAC**
- **PLAXIS**
- **SAP2000**
- **OPTUM-CE**
- **ZSoil**
- **DIANA-FEA**
- **CESAR-LCPC**
- ...



FLAC[®]



PLAXIS[®] 2D
CONNECT Edition



Op⁺um^{CE}

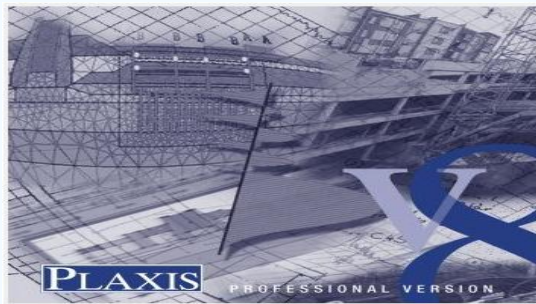


CESAR-LCPC

Logiciel Eléments finis

www.cesar-lcpc.com

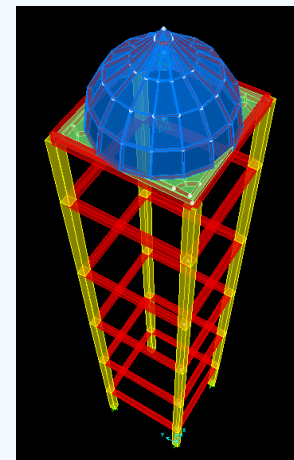
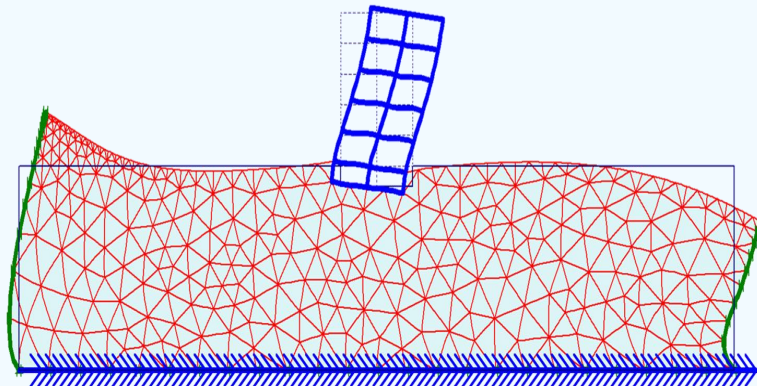
EXEMPLES DE CALCUL

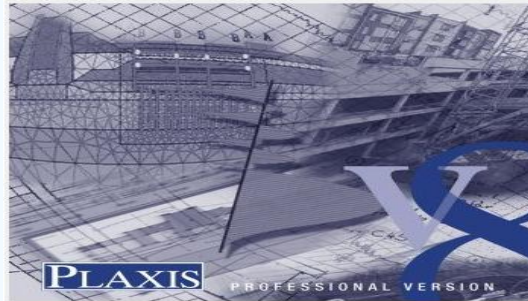


EXEMPLE N° 1 : BÂTIMENT

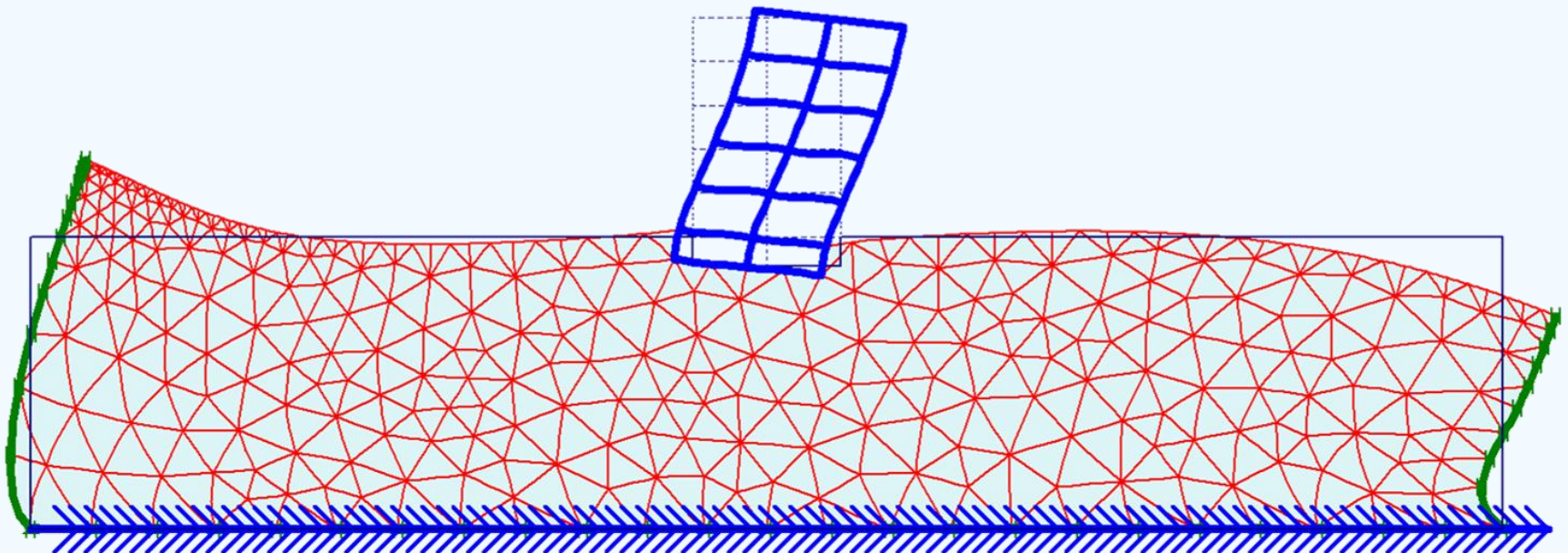


EXEMPLE N° 2 : MINARET



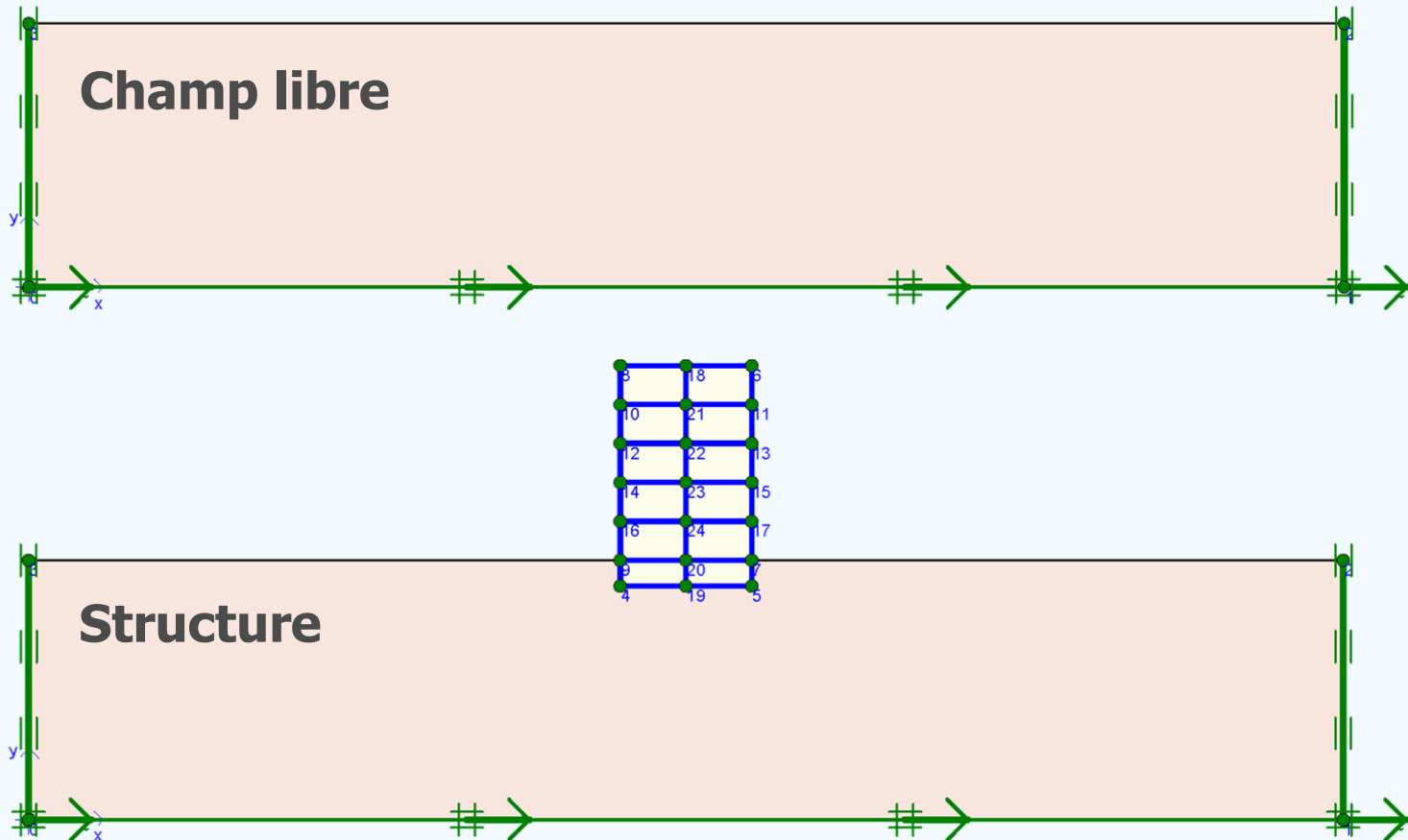


EXEMPLE N° 1 : BÂTIMENT



□ Exemple n°: 1

- **Modèle de calcul : Bâtiment R+4 avec vide sanitaire**



□ Exemple n°: 1

- **Modèle de calcul : Caractéristiques du massif de fondation**

Material sets

Mohr-Coulomb - Massif de fondation

General | Parameters | Interfaces

Material Set

Identification: Massif de fondation

Material model: Mohr-Coulomb

Material type: Drained

General properties

γ_{unsat} 16.000 kN/m³

γ_{sat} 18.000 kN/m³

Comments

Permeability

k_x : 1.157E-08 m/s

k_y : 1.157E-08 m/s

Advanced...

Next Ok Cancel Help

Exemple n°: 1

- Modèle de calcul : Caractéristiques du massif de fondation**

Material sets

Mohr-Coulomb - Massif de fondation

General Parameters Interfaces

Stiffness

E_{ref} : 1.000E+04 kN/m²

ν (nu): 0.350

Strength

c_{ref} : 5.000 kN/m²

ϕ (phi): 25.000 °

ψ (psi): 0.000 °

Alternatives

G_{ref} : 3703.704 kN/m²

E_{oed} : 1.605E+04 kN/m²

Velocities

V_s : 47.630 m/s

V_p : 99.150 m/s

Advanced...

Next Ok Cancel Help

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

$$E_{oed} = \frac{(1 - \nu)E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$$V_p = \sqrt{\frac{E_{oed}}{\rho}}$$

□ Exemple n°: 1

- **Modèle de calcul : Caractéristiques du massif de fondation**

Material sets

Mohr-Coulomb - Massif de fondation

General | Parameters | Interfaces

Strength

☐ Rigid

☒ Manual

R_{inter} : 0.500

Real interface thickness

δ_{inter} : 0.000

Next Ok Cancel Help

□ Exemple n°: 1

- **Modèle de calcul : Caractéristiques de la structure**

Material sets

Global >>>

Project Database

Plate properties

Material set

Identification: Structure

Material type: Elastic

Comments

Properties

EA : 5.000E+06 kN/m

EI : 9000.000 kNm²/m

d : 0.147 m

w : 5.000 kN/m/m

v : 0.000

M_p : 1.000E+15 kNm/m

N_p : 1.000E+15 kN/m

Rayleigh α : 0.010

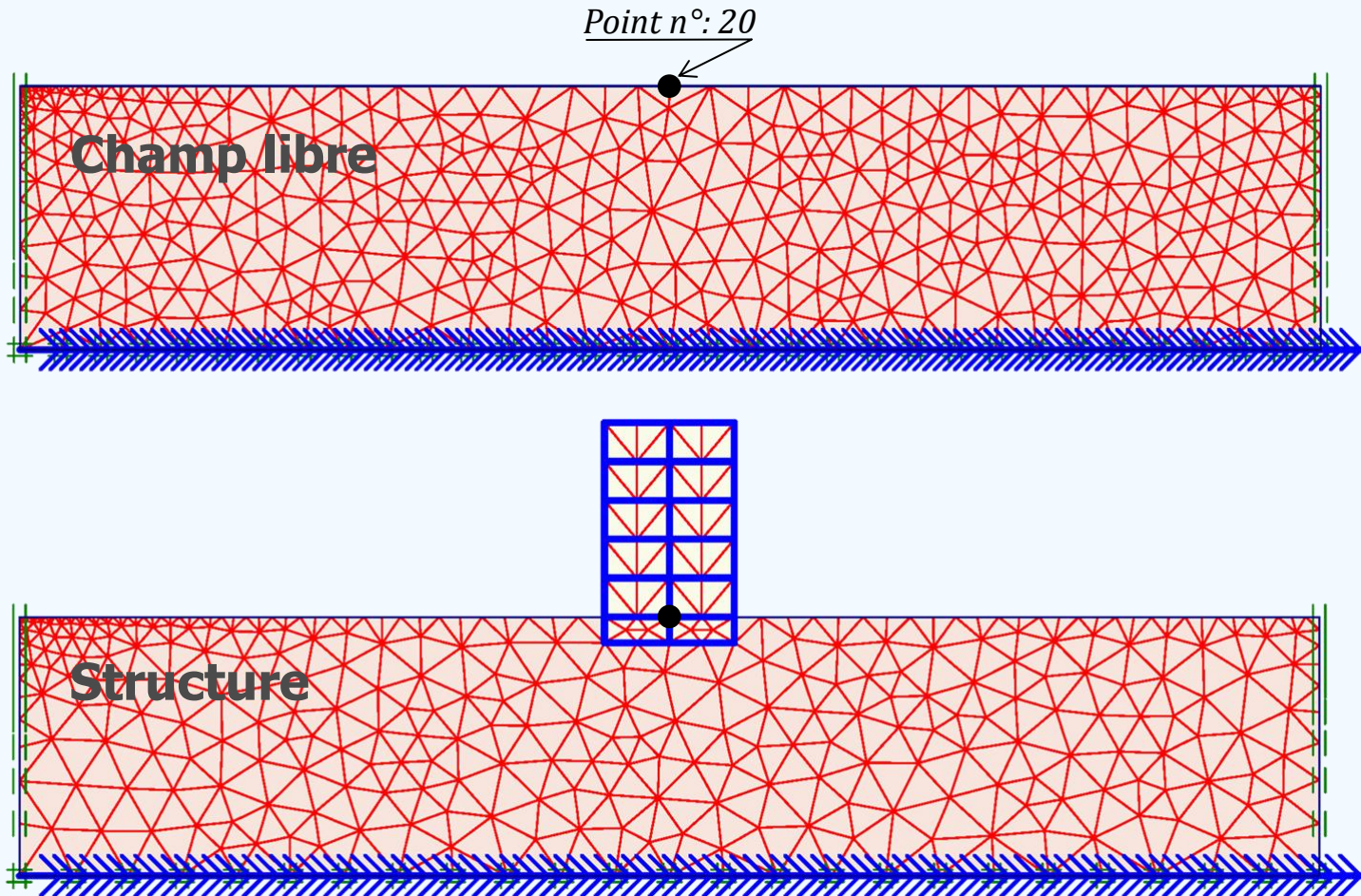
Rayleigh β : 0.010

Ok Cancel Help

OK Apply Help

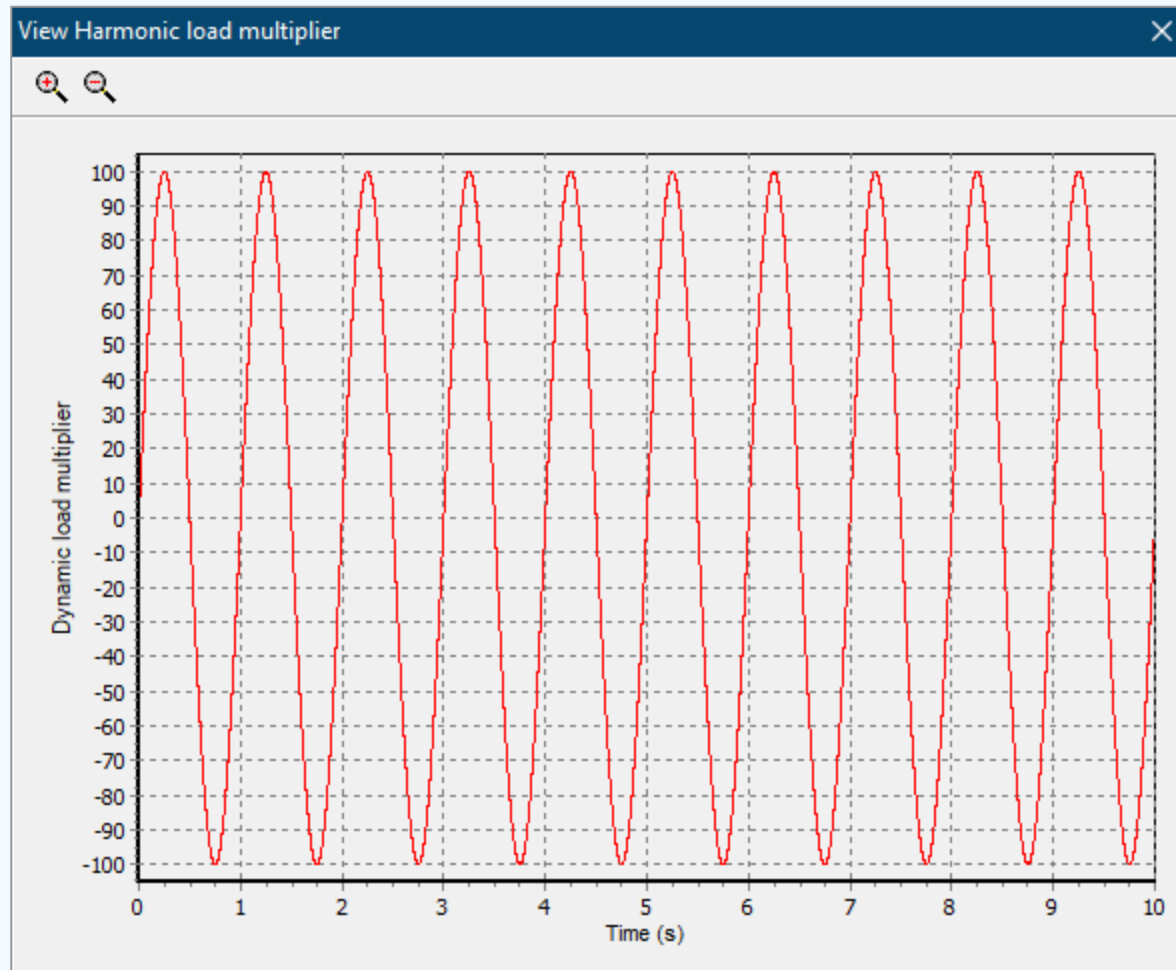
□ Exemple n°: 1

- **Modèle de calcul : Maillage en éléments finis**



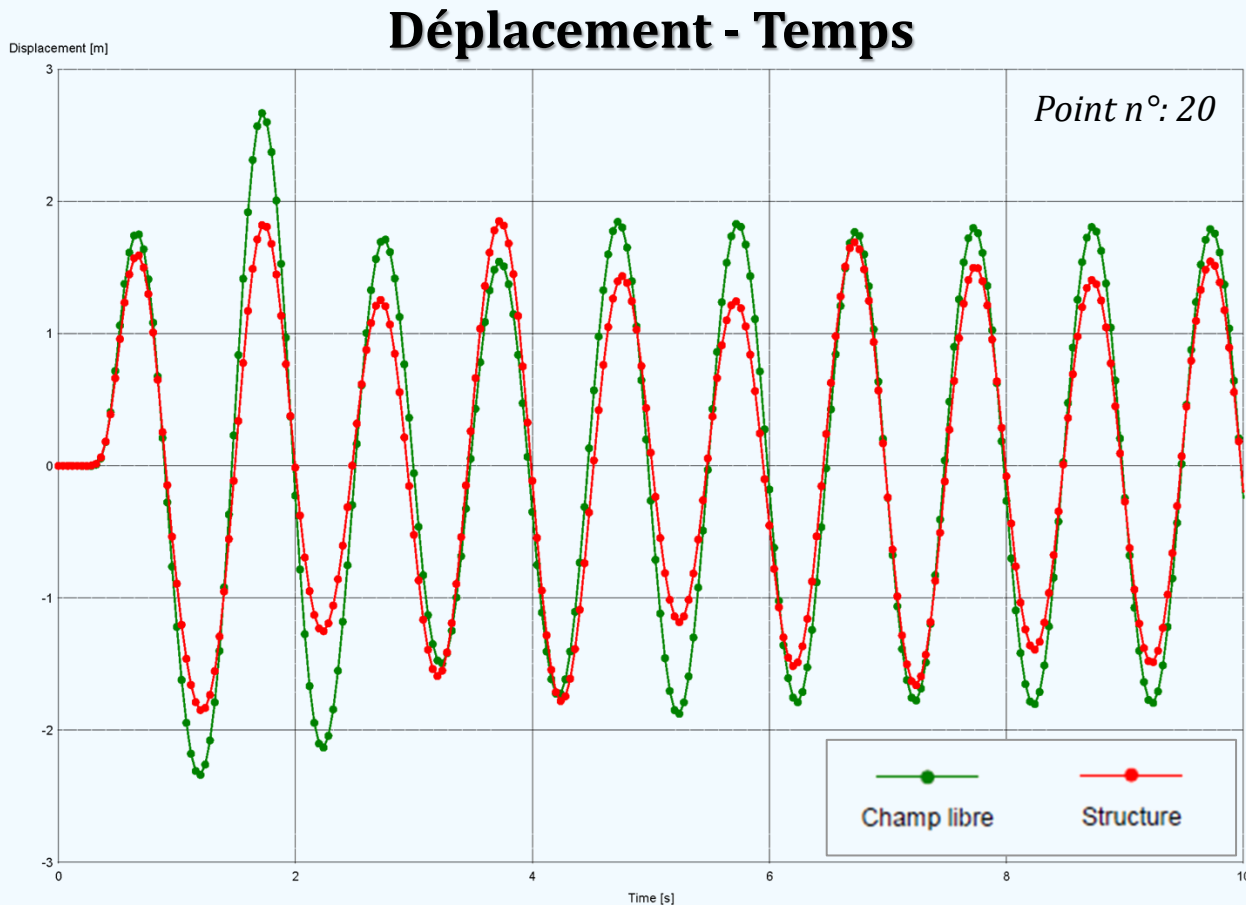
□ Exemple n°: 1

- **Cas d'une vibration harmonique : Multiplicateur du chargement dynamique**



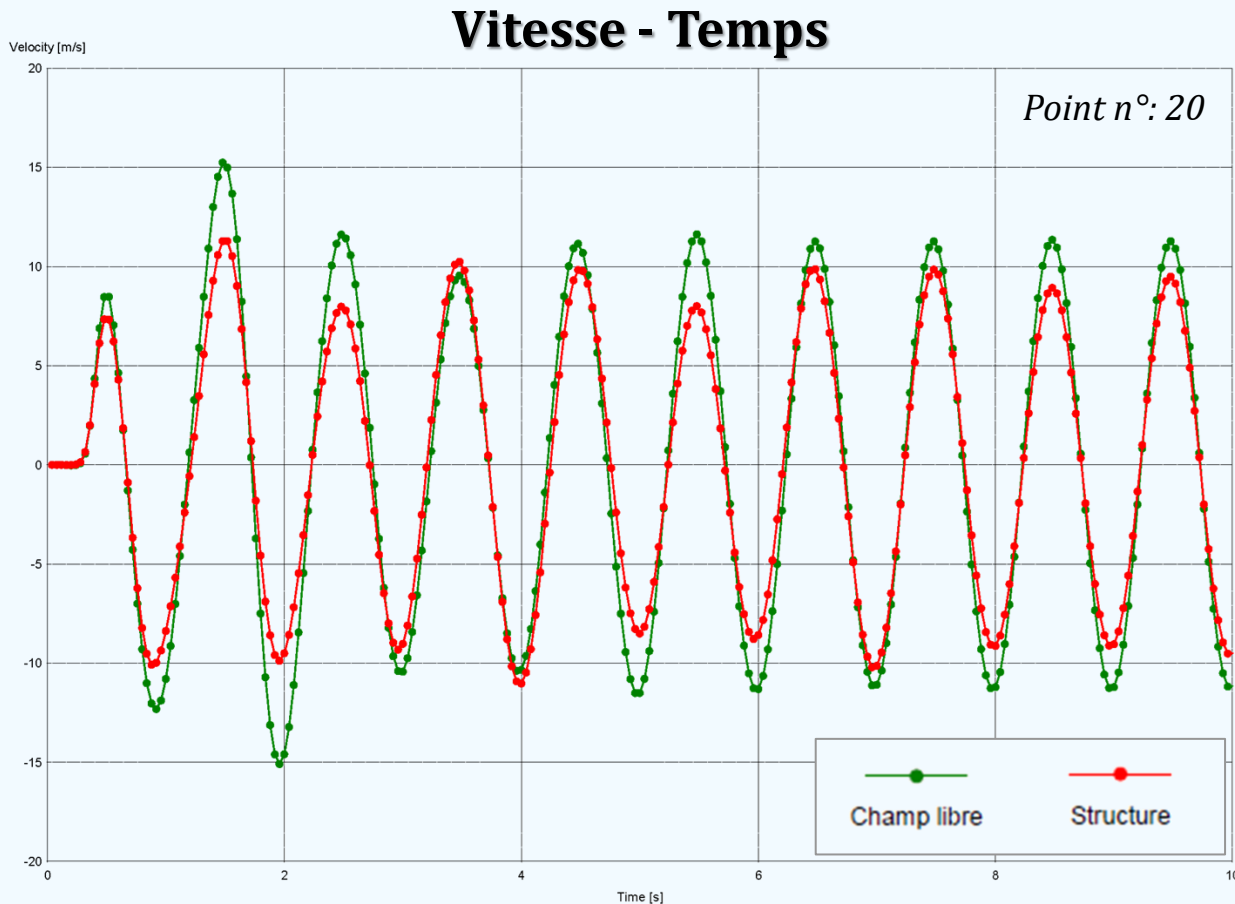
Exemple n°: 1

- Cas d'une vibration harmonique : Résultats des calculs**



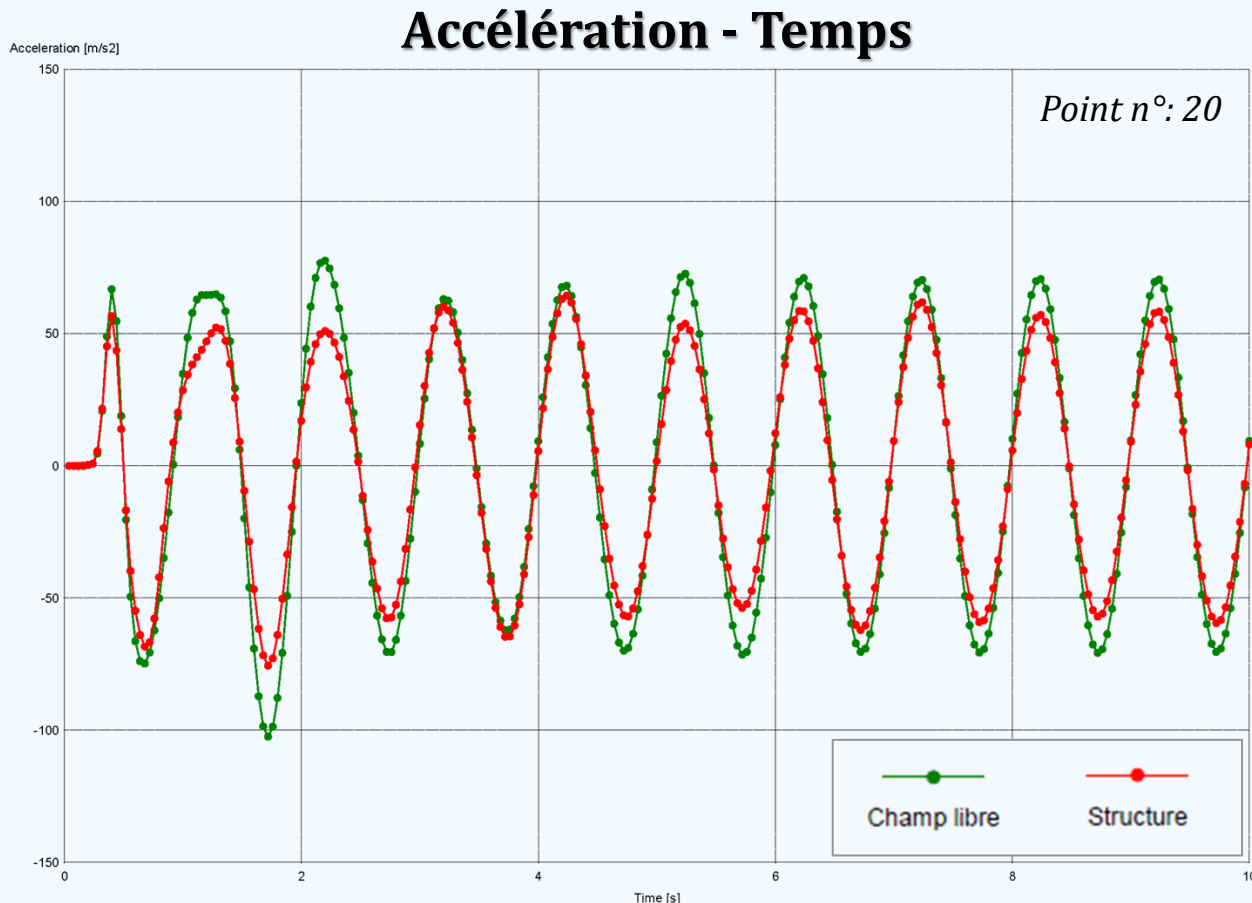
□ Exemple n°: 1

- **Cas d'une vibration harmonique : Résultats des calculs**



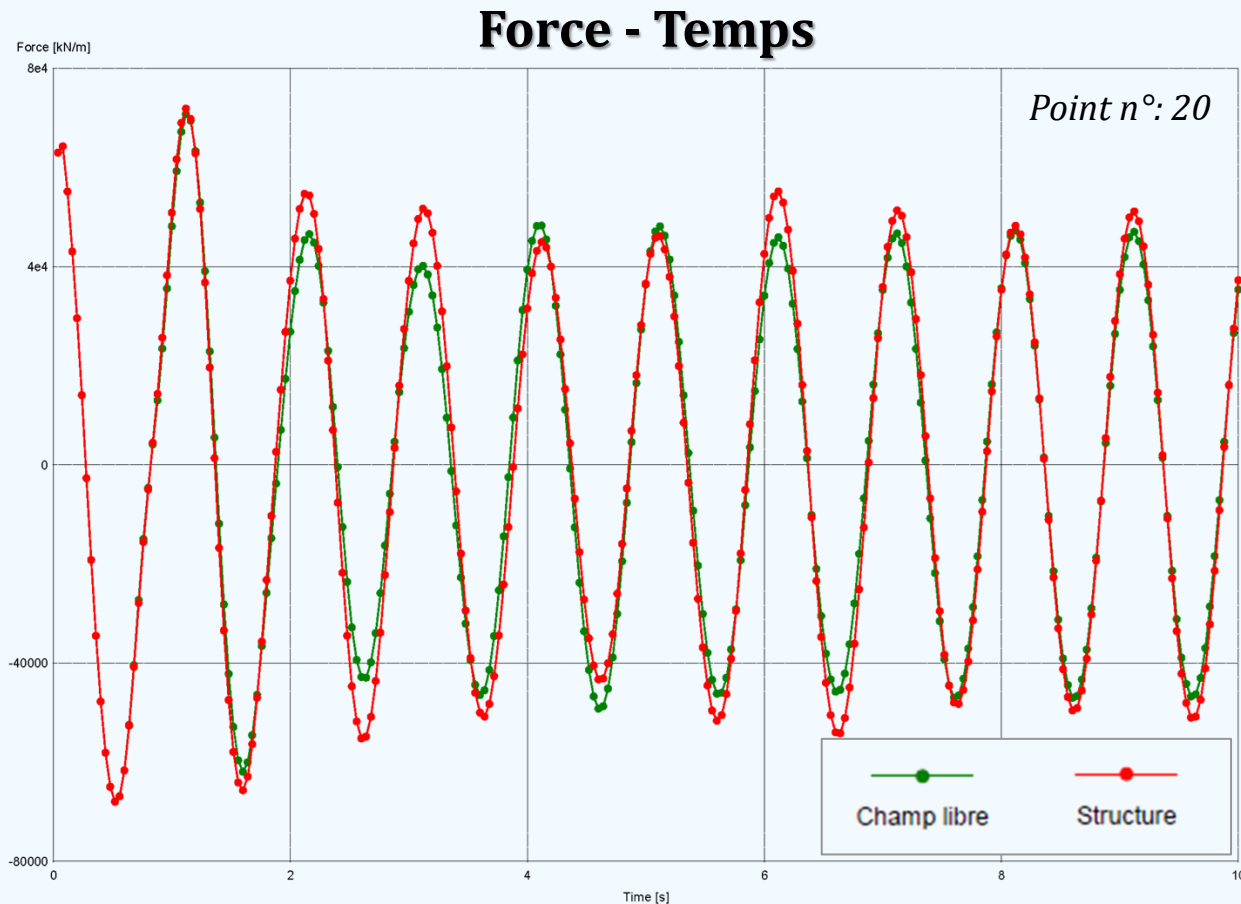
□ Exemple n°: 1

- **Cas d'une vibration harmonique : Résultats des calculs**



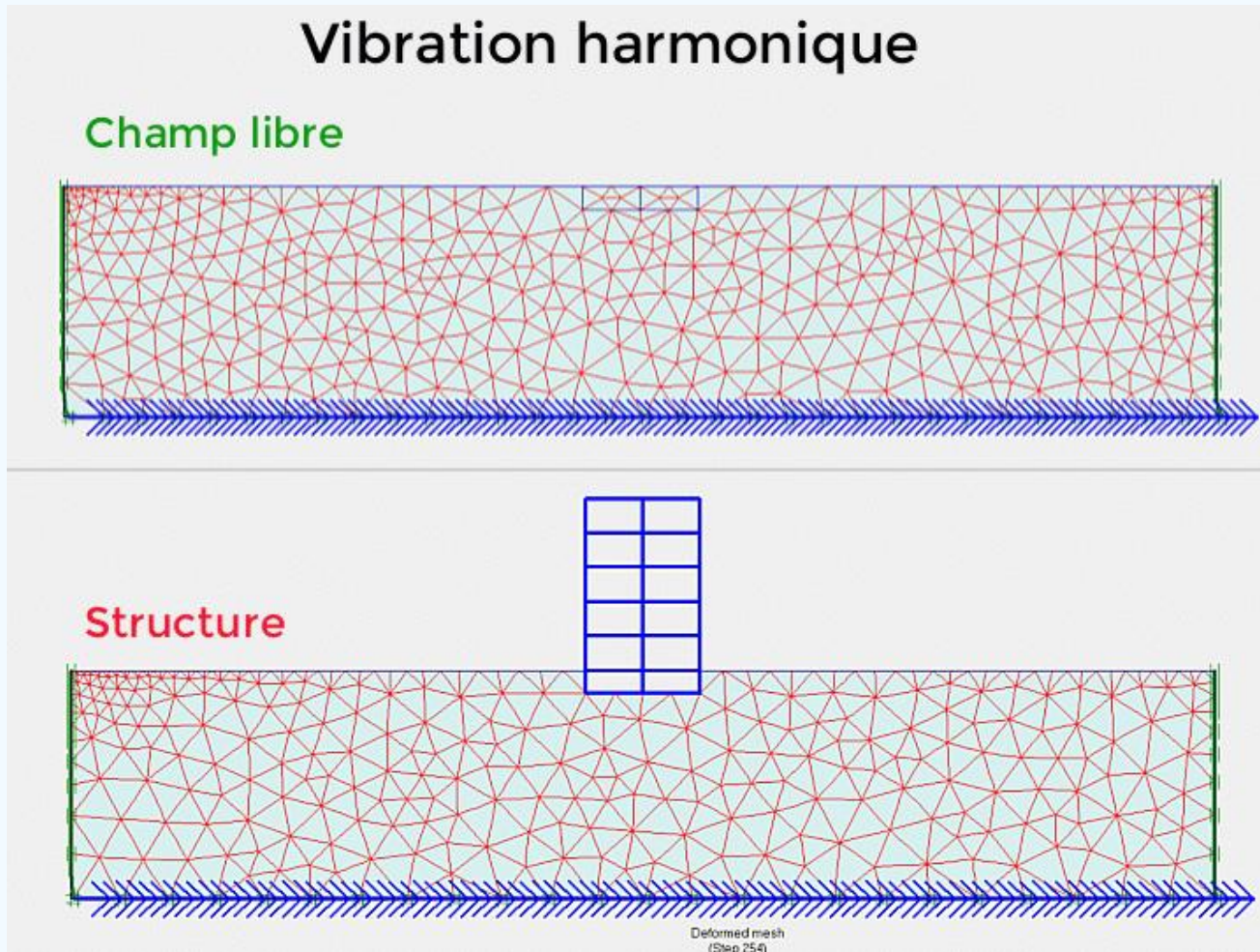
□ Exemple n°: 1

- **Cas d'une vibration harmonique : Résultats des calculs**



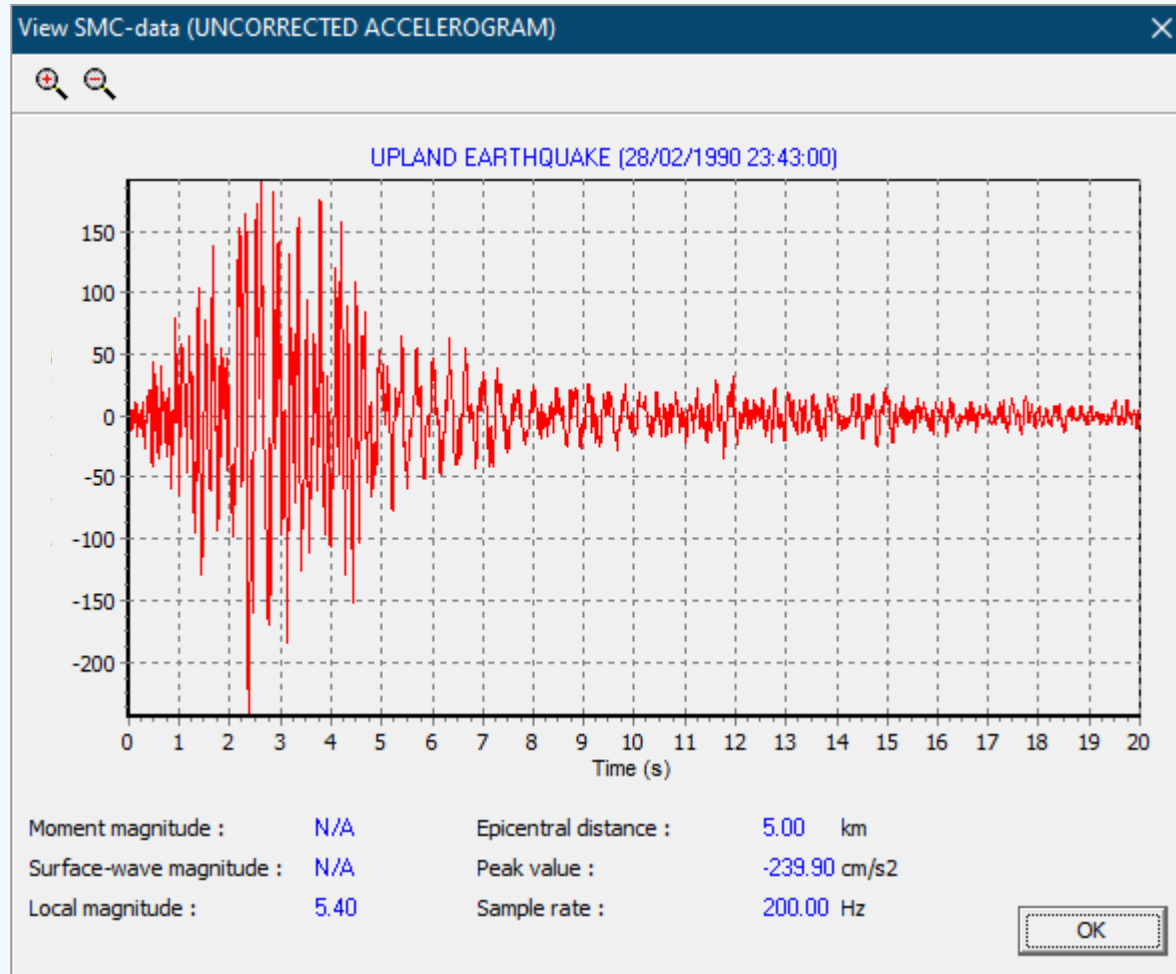
□ Exemple n°: 1

- **Cas d'une vibration harmonique : Animation**



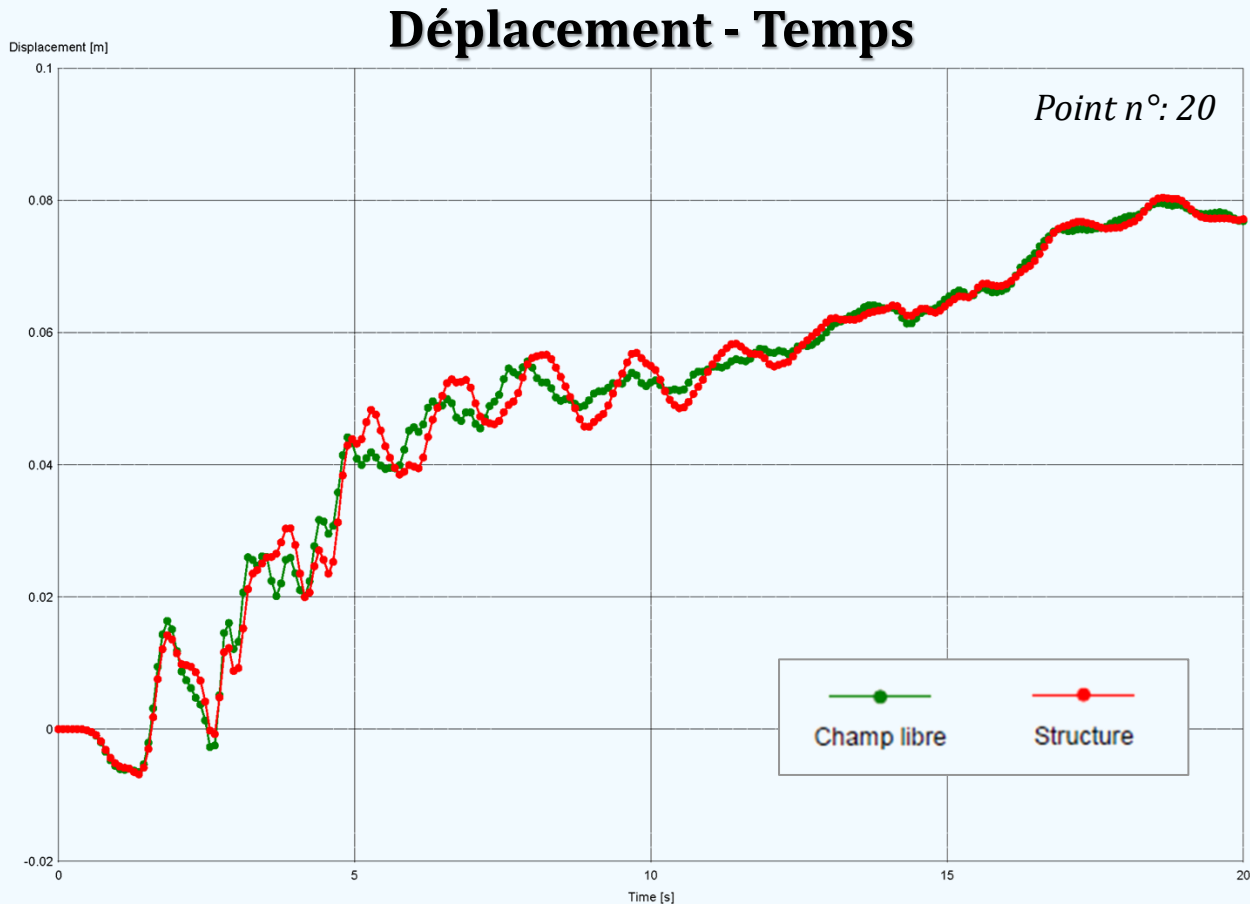
Exemple n°: 1

- Cas d'une vibration sismique : Séisme d'Upland-California, USA**



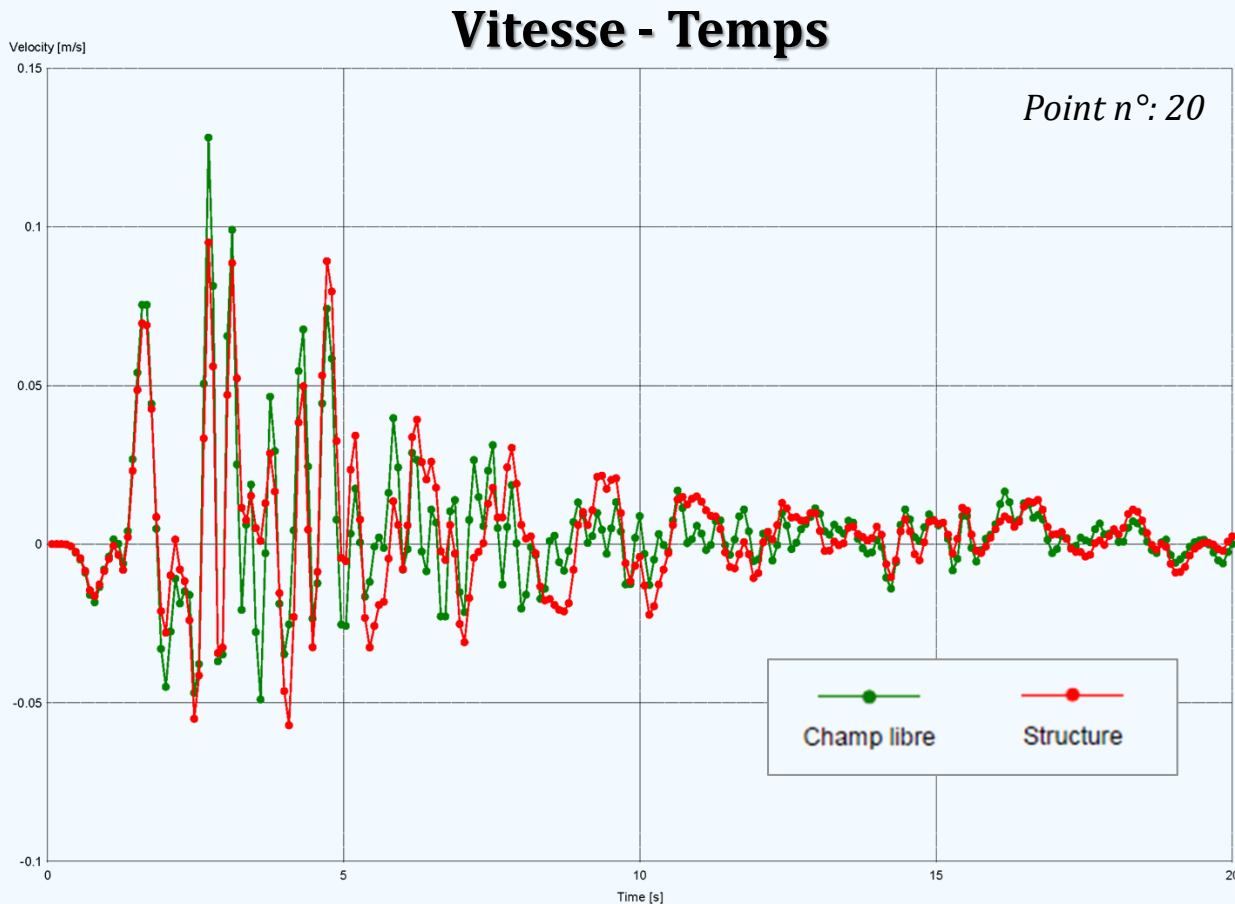
□ Exemple n°: 1

- **Cas d'une vibration sismique : Résultats des calculs**



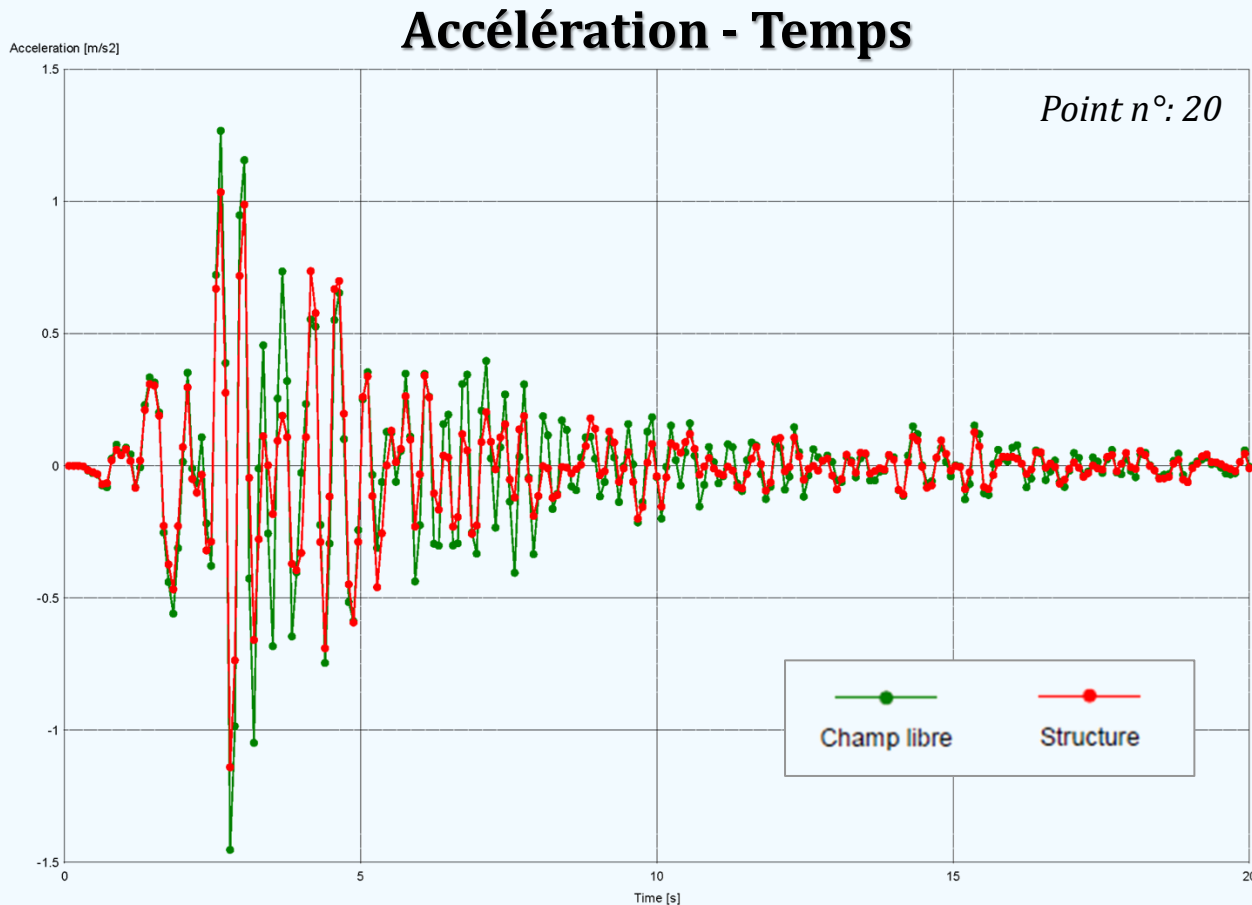
□ Exemple n°: 1

- **Cas d'une vibration sismique : Résultats des calculs**



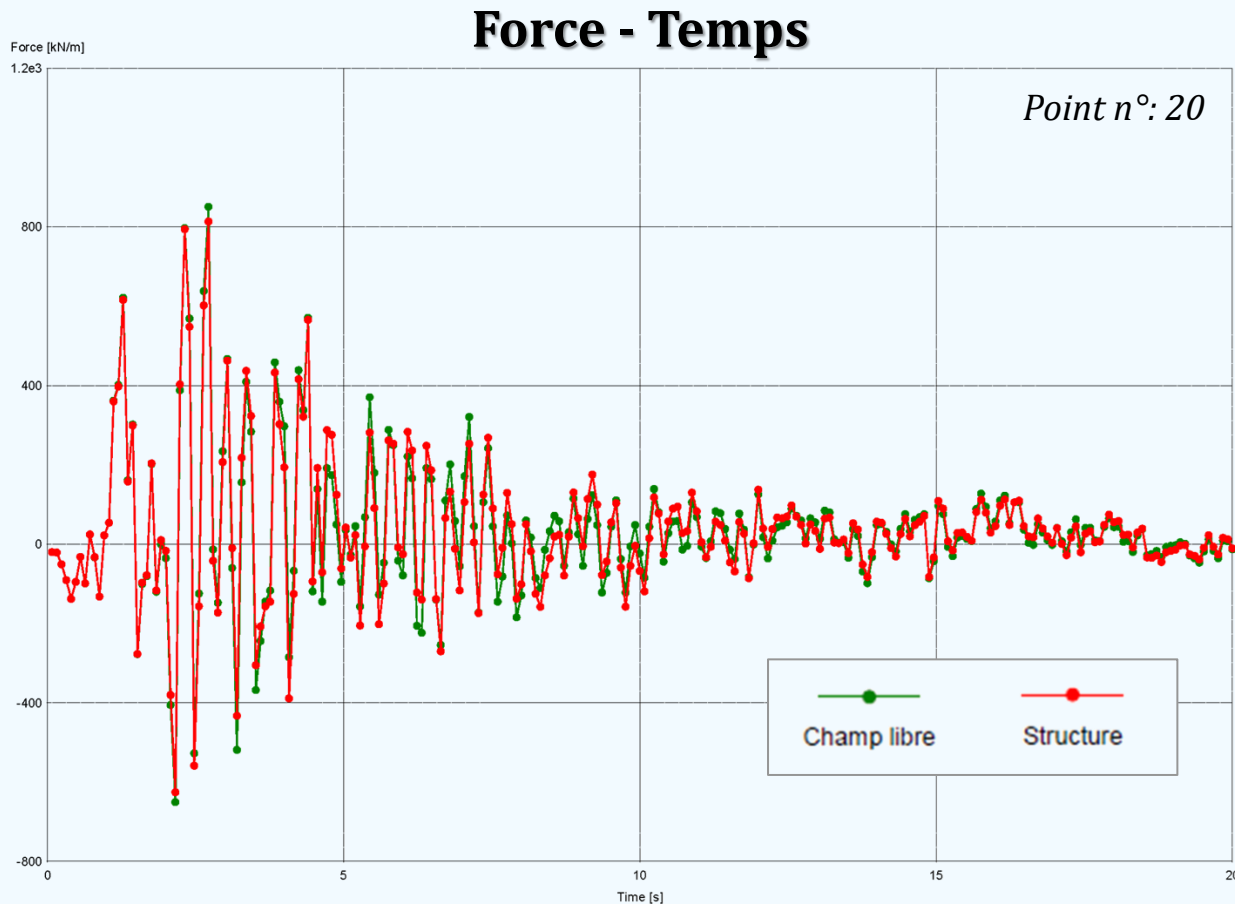
□ Exemple n°: 1

- **Cas d'une vibration sismique : Résultats des calculs**



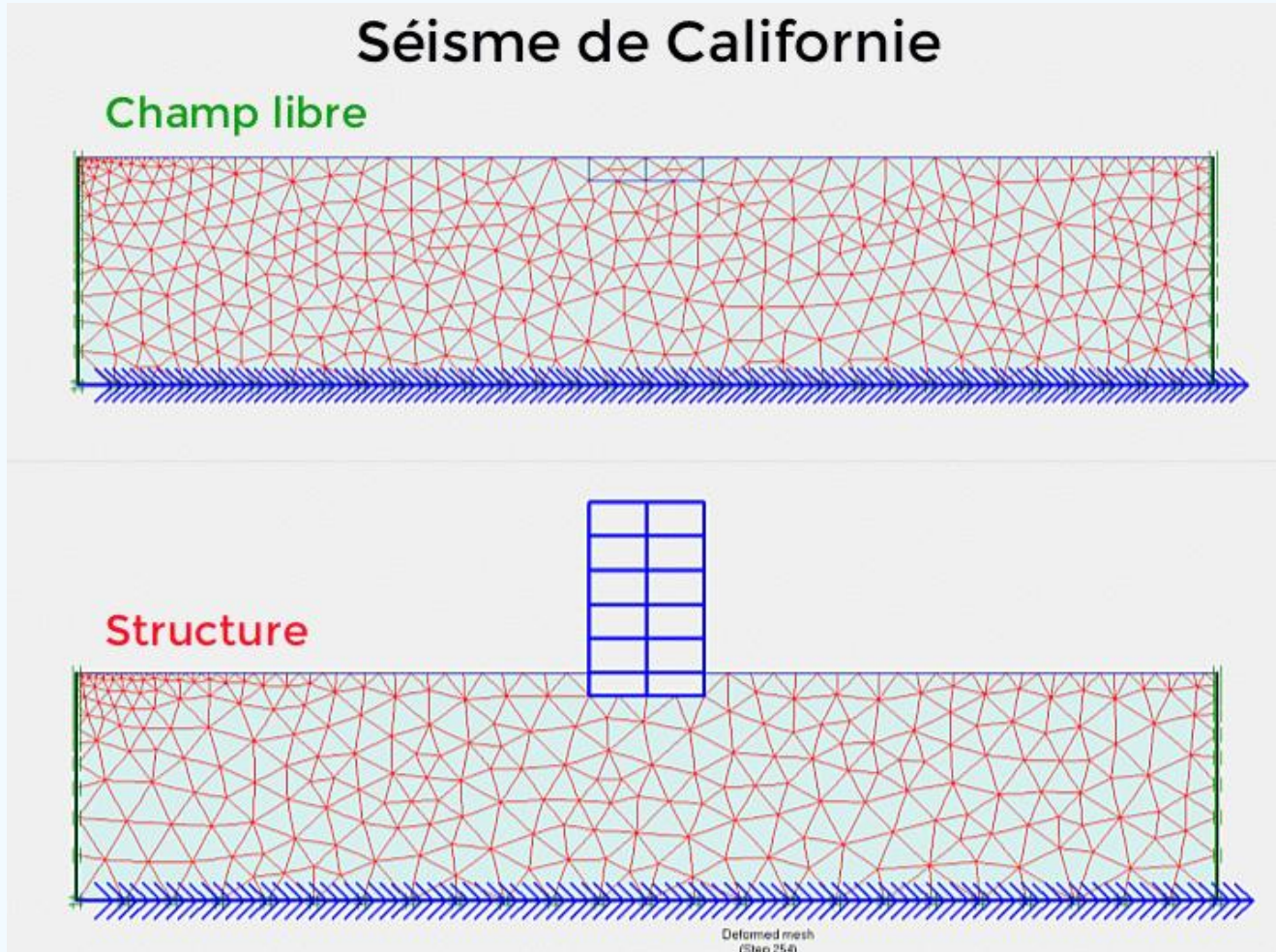
□ Exemple n°: 1

- **Cas d'une vibration sismique : Résultats des calculs**



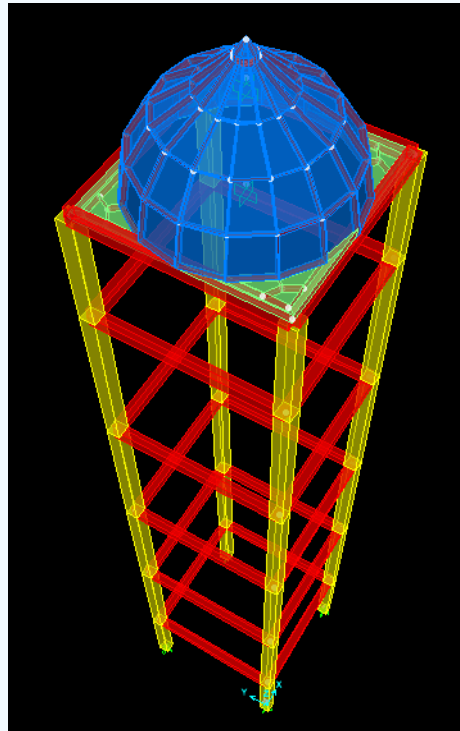
□ Exemple n°: 1

- **Cas d'une vibration sismique : Animation**





EXEMPLE N° 2 : MINARET



□ Exemple n° 2

- **Modèle de calcul** : Minaret (R+5) fondé sur différents types d'appuis

✓ 1^{ère} Partie : Modèle de ressorts

➤ Type de fondations

- Semelles
- Radier

➤ Type d'appuis

- Encastrement (calcul de référence : sans ISS)
- Ressorts (avec ISS)

✓ 2^{ème} Partie : Modèle de sol

➤ Type de fondations :

- Semelles
- Radier
- Pieux

➤ Type d'appuis :

- Massif sableux
- Massif argileux

Exemple n° 2

Caractéristiques des matériaux : Béton & Acier

SAP2000 v23.3.1 Ultimate 64-bit - minaret

Material Property Data (Concrete)

General Data

Material Name and Display Color: Béton

Material Type: Concrete

Material Grade: fc28

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 24

Mass per Unit Volume: 2.4473

Units: KN, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 32164195

Poisson, U: 0.2

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 9.900E-06

Shear Modulus, G: 13401748

Other Properties For Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, f_c: 19613.3

Expected Concrete Compressive Strength: 19613.3

☐ Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor:

☐ Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Material Property Data (Steel)

General Data

Material Name and Display Color: Acier

Material Type: Steel

Material Grade: S355

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 76.9729

Mass per Unit Volume: 7.849

Units: KN, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 2.100E+08

Poisson, U: 0.3

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 1.170E-05

Shear Modulus, G: 80769231

Other Properties For Steel Materials

Minimum Yield Stress, F_y: 355000

Minimum Tensile Stress, F_u: 510000

Expected Yield Stress, F_{ye}: 390500

Expected Tensile Stress, F_{ue}: 561000

☐ Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

□ Exemple n° 2

- **Sollicitations appliquées : Actions permanentes et Actions sismiques**

- ✓ **Actions permanentes :**

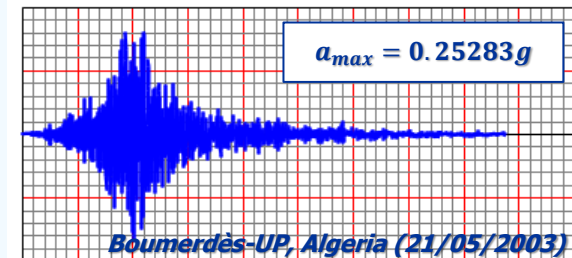
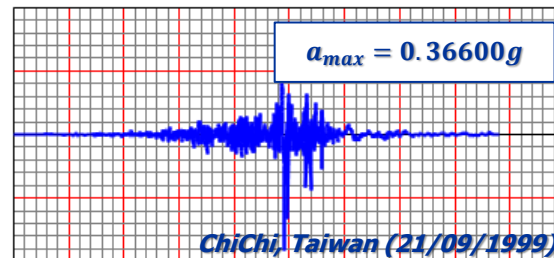
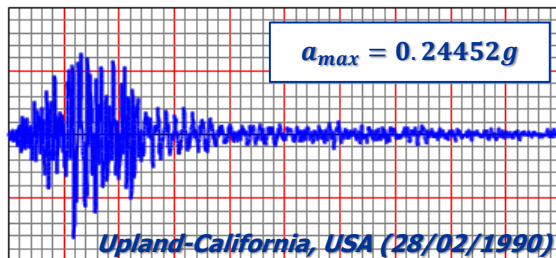
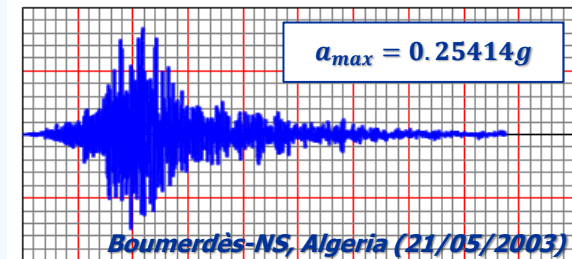
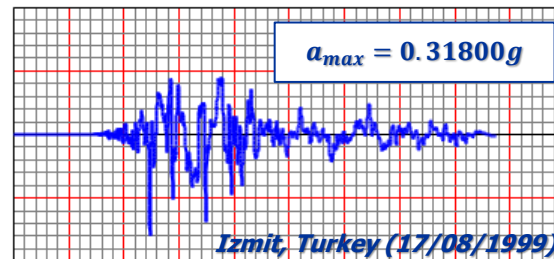
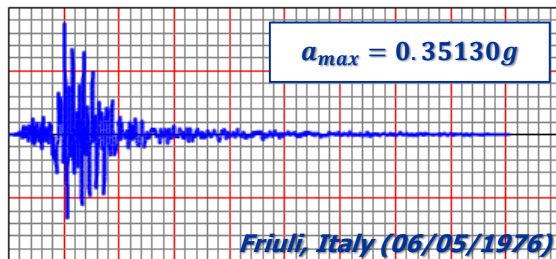
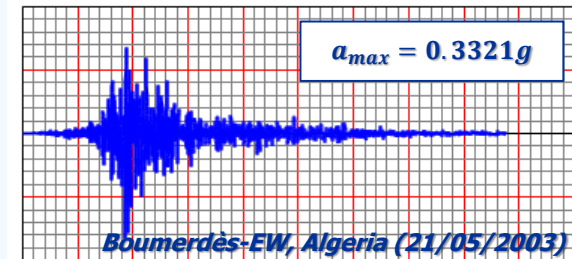
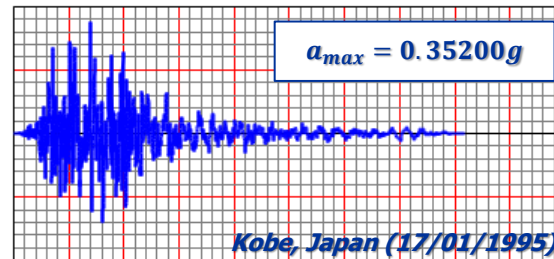
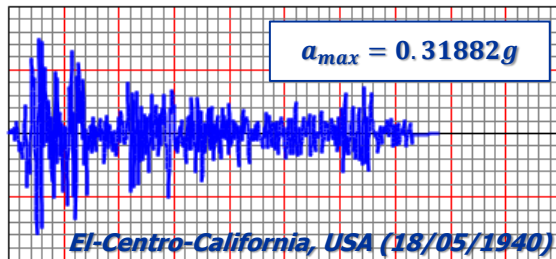
- *Poids propre de la structure*
- *Surcharges d'exploitation*

- ✓ **Actions sismiques :**

- *Séisme d'El-Centro-California, USA (18/05/1940, Mw=6.9)*
- *Séisme de Friuli, Italie (06/05/1976, Mw=6.5)*
- *Séisme d'Upland-California, USA (28/02/1990, Mw=5.7)*
- *Séisme de Kobe, Japon (17/01/1995, Mw=7.2)*
- *Séisme d'Izmit, Turquie (17/08/1999, Mw=6.9)*
- *Séisme de ChiChi, Taiwan (21/09/1999, Mw=7.7)*
- *Séisme de Boumerdès, Algérie (21/05/2003, Mw=6.8)*

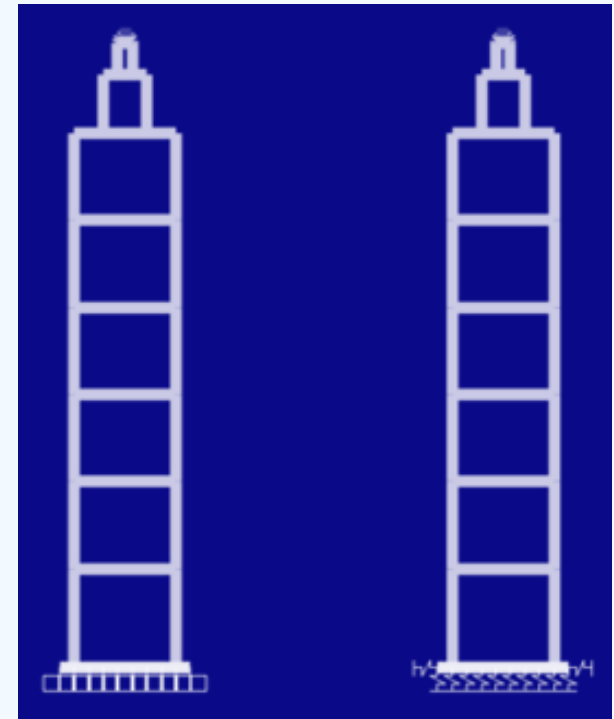
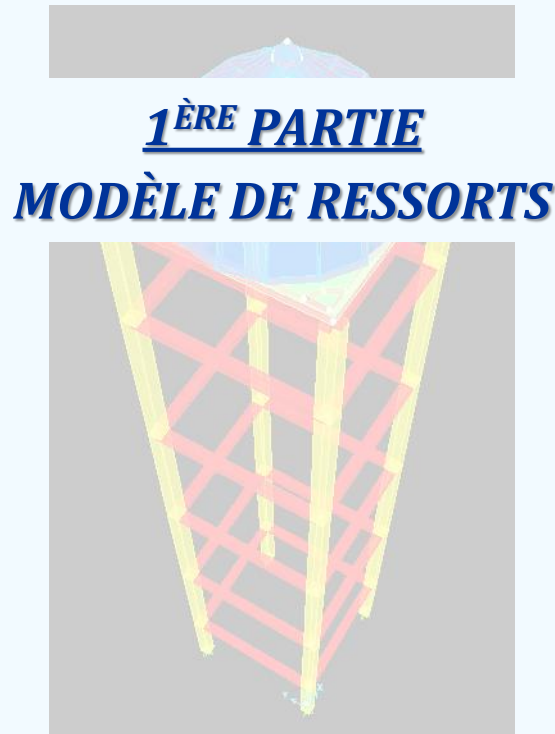
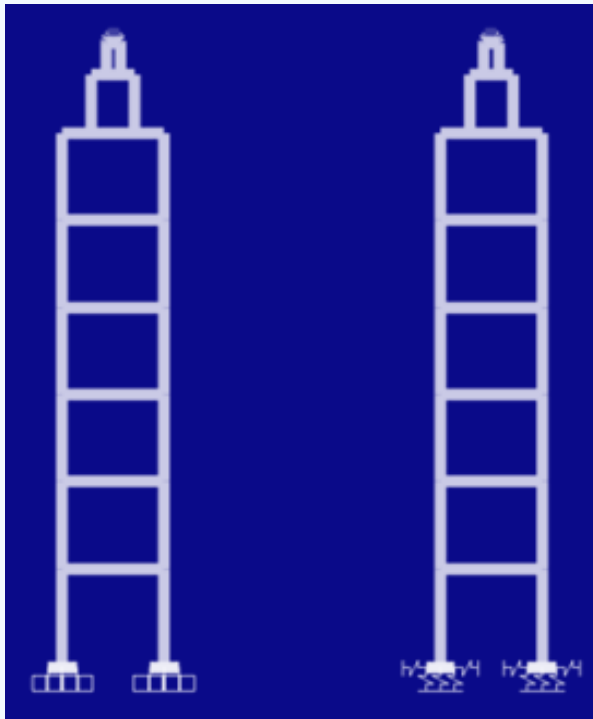
Exemple n° 2

- Sollicitations appliquées : Accélérogrammes sismiques considérés**



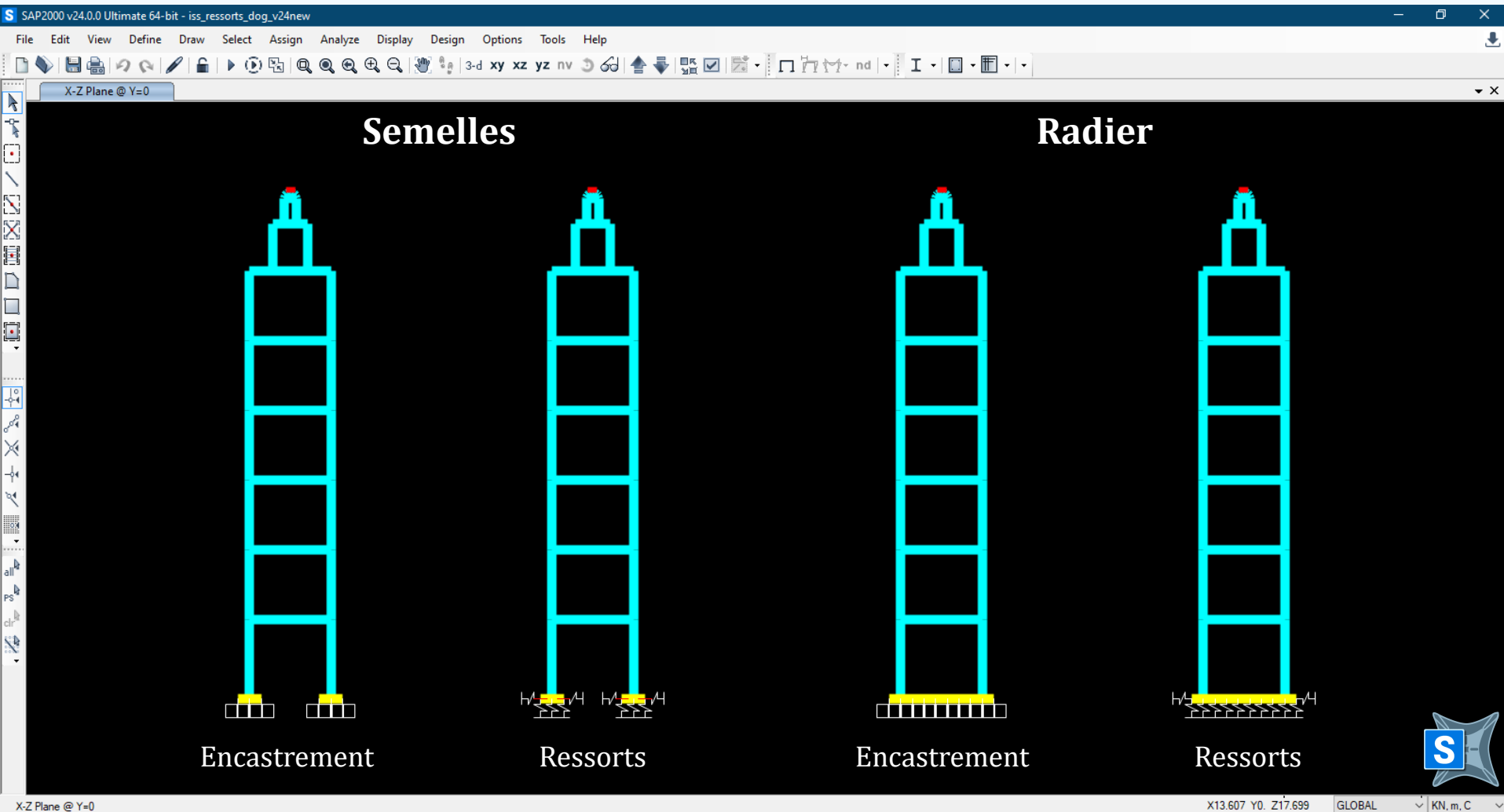


EXEMPLE N° 2 : MINARET



Exemple n° 2 : Modèle de ressorts

Configuration géométrique du modèle de calcul

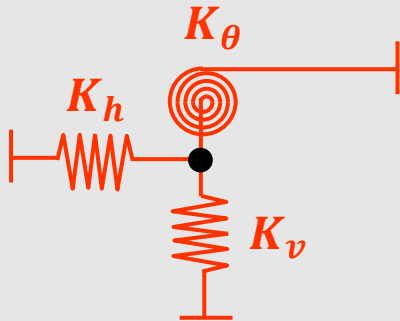


Exemple n° 2 : Modèle de ressorts

- Caractéristiques des ressorts (Modèle de Kausel et al., 1978)

✓ Formulaire : Formules de Gazetas (1983)

Semelles circulaires



$$K_v = \frac{4GR}{1-\nu}$$

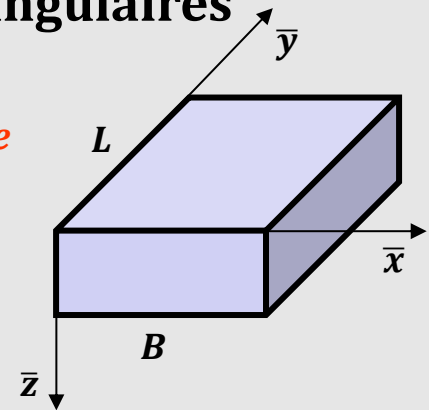
$$K_h = \frac{8GR}{2-\nu}$$

$$K_\theta = \frac{8GR^3}{3(1-\nu)}$$

Semelles rectangulaires

$$K_{rectangle} = c_f K_{cercle}$$

$$c_f = k_1 \frac{L}{B} + k_2 \left(\frac{L}{B} \right)^k$$



Terme de raideur : c_f	k_1	k_2	k
Raideur verticale, K_v	0.37	0.77	0.25
Raideur horizontale selon B, K_{hx}	0.50	0.63	0.15
Raideur horizontale selon L, K_{hy}	0.37	0.77	0.25
Raideur en rotation selon B, $K_{\theta x}$	1.12	0.23	0.00
Raideur en rotation selon L, $K_{\theta y}$	0.00	1.40	2.40

Exemple n° 2 : Modèle de ressorts

Caractéristiques des ressorts (Modèle de Kausel et al., 1978)

- ✓ Type de sol : Site 3 (Sol meuble d'après le RPA99 - version 2003)
- ✓ Raideurs des ressorts : Translations (K_v et K_h) & Rotations (K_θ)

$$G = \rho V_s^2$$

$$E = 2(1 + \nu)G$$

Site	S1 rocheux	S2 ferme	S3 meuble	S4 très meuble	RPA99 version 2003
$\rho =$	2.10	1.80	1.60	1.50	Density
$\nu =$	0.25	0.30	0.35	0.40	Poisson's ratio
V_s (m/s)=	1 200.00	600.00	300.00	150.00	Shear velocity
G (kPa)=	3 024 000	648 000	144 000	33 750	Shear Modulus
E (kPa)=	7 560 000	1 684 800	388 800	94 500	Young's Modulus
Semi	S1 (B) - site rocheux ($V_s > 800$ m/s)				
B (m)	S2 (C) - site ferme (400 m/s $< V_s < 800$ m/s)				
L (m)	S3 (D) - site meuble (200 m/s $< V_s < 400$ m/s)				
$K_v =$	S4 (E) - site très meuble ($V_s < 200$ m/s)				
$K_{hx} =$					
$K_{hy} =$					
$K_{\theta x} =$	1 814 400	416 571	99 692	25 313	kN-m
$K_{\theta y} =$	1 881 600	432 000	103 385	26 250	kN-m
Radier rectangulaire de largeur B et de longueur L ($L \geq B$)					
B (m)=	1.00				
L (m)=	4.50				
$K_v =$	22 470 223	5 158 980	1 234 628	313 480	kN/m/m
$K_{hx} =$	21 008 651	4 634 261	1 061 043	256 453	kN/m
$K_{hy} =$	19 260 191	4 248 572	972 737	235 110	kN/m

Exemple n° 2 : Modèle de ressorts

Caractéristiques des ressorts (Modèle de Kausel et al., 1978)

✓ Type de sol : Site 3 (Sol meuble d'après le RPA99 - version 2003)

✓ Raideurs des ressorts : Translations (K_v et K_h) & Rotations (K_θ)

$$G = \rho V_s^2$$

$$E = 2(1 + \nu)G$$

Site	S1 rocheux	S2 ferme	S3 meuble	S4 très meuble	RPA99 version 2003
$\rho =$	2.10	1.80	1.60	1.50	Density
$\nu =$	0.25	0.30	0.35	0.40	Poisson's ratio
V_s (m/s)=	1 200.00	600.00	300.00	150.00	Shear velocity
G (kPa)=	3 024 000	648 000	144 000	33 750	Shear Modulus
E (kPa)=	7 560 000	1 684 800	388 800	94 500	Young's Modulus
Semelle rectangulaire de largeur B et de longueur L ($L \geq B$)					
B (m)=	1.00				
L (m)=	1.00				
$K_v =$	9 192 960	2 110 629	505 108	128 250	kN/m
$K_{hx} =$	7 810 560	1 722 918	394 473	95 344	kN/m
$K_{hy} =$	7 879 680	1 738 165	397 964	96 188	kN/m
$K_{\theta x} =$	1 814 400	416 571	99 692	25 313	kN-m
$K_{\theta y} =$	1 881 600	432 000	103 385	26 250	kN-m
Radier rectangulaire de largeur B et de longueur L ($L \geq B$)					
B (m)=	1.00				
L (m)=	4.50				
$K_v =$	22 470 223	5 158 980	1 234 628	313 480	kN/m/m
$K_{hx} =$	21 008 651	4 634 261	1 061 043	256 453	kN/m
$K_{hy} =$	19 260 191	4 248 572	972 737	235 110	kN/m

Voir page 51

Exemple n° 2 : Modèle de ressorts

Caractéristiques des ressorts (Modèle de Kausel et al., 1978)

Type de sol : Site 3 (Sol meuble d'après le RPA99 - version 2003)

Raideurs des ressorts : Translations (K_v et K_h) & Rotations (K_θ)

S Object Model - Point Information

Location Assignments Loads

Identification
Label: 51

Constraints	None
Restraint	None
Local Axes	Default
Springs	
Coordinate System	Local
U1 K_h	394473.
U3 K_v	505108.
R2 K_θ	103385.
Masses	None
Panel Zone	None
Joint Patterns	None
Group	All
Generalized Displs	None
RS Named Sets	None
Plot Functions	None
Merge Number	0

KN, m, C

Reset All

Update Display

Modify Display

OK

Cancel

Double click white background cell to edit item.



S Object Model - Point Information

Location Assignments Loads

Identification
Label: 17

Constraints	None
Restraint	None
Local Axes	Default
Springs	
Coordinate System	Local
U1 K_h	1061043.
U3 K_v	1234628.
Masses	None
Panel Zone	None
Joint Patterns	None
Group	All
Generalized Displs	None
RS Named Sets	None
Plot Functions	None
Merge Number	0

KN, m, C

Reset All

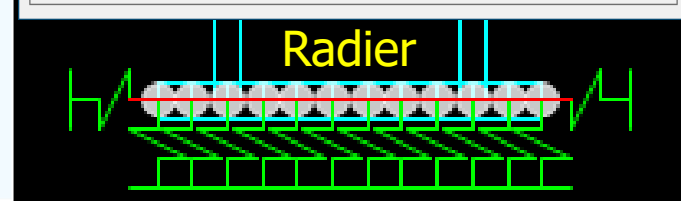
Update Display

Modify Display

OK

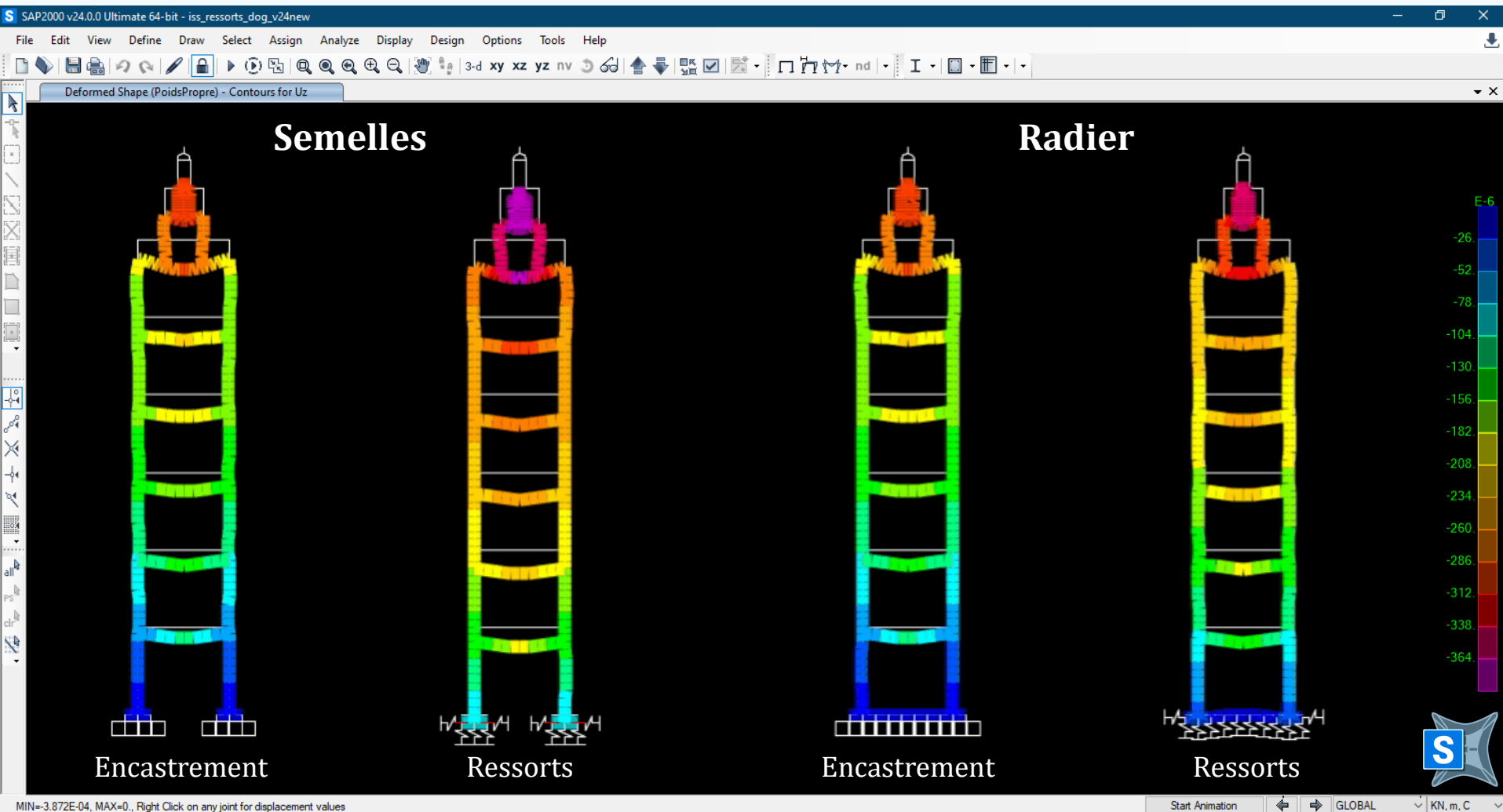
Cancel

Double click white background cell to edit item.



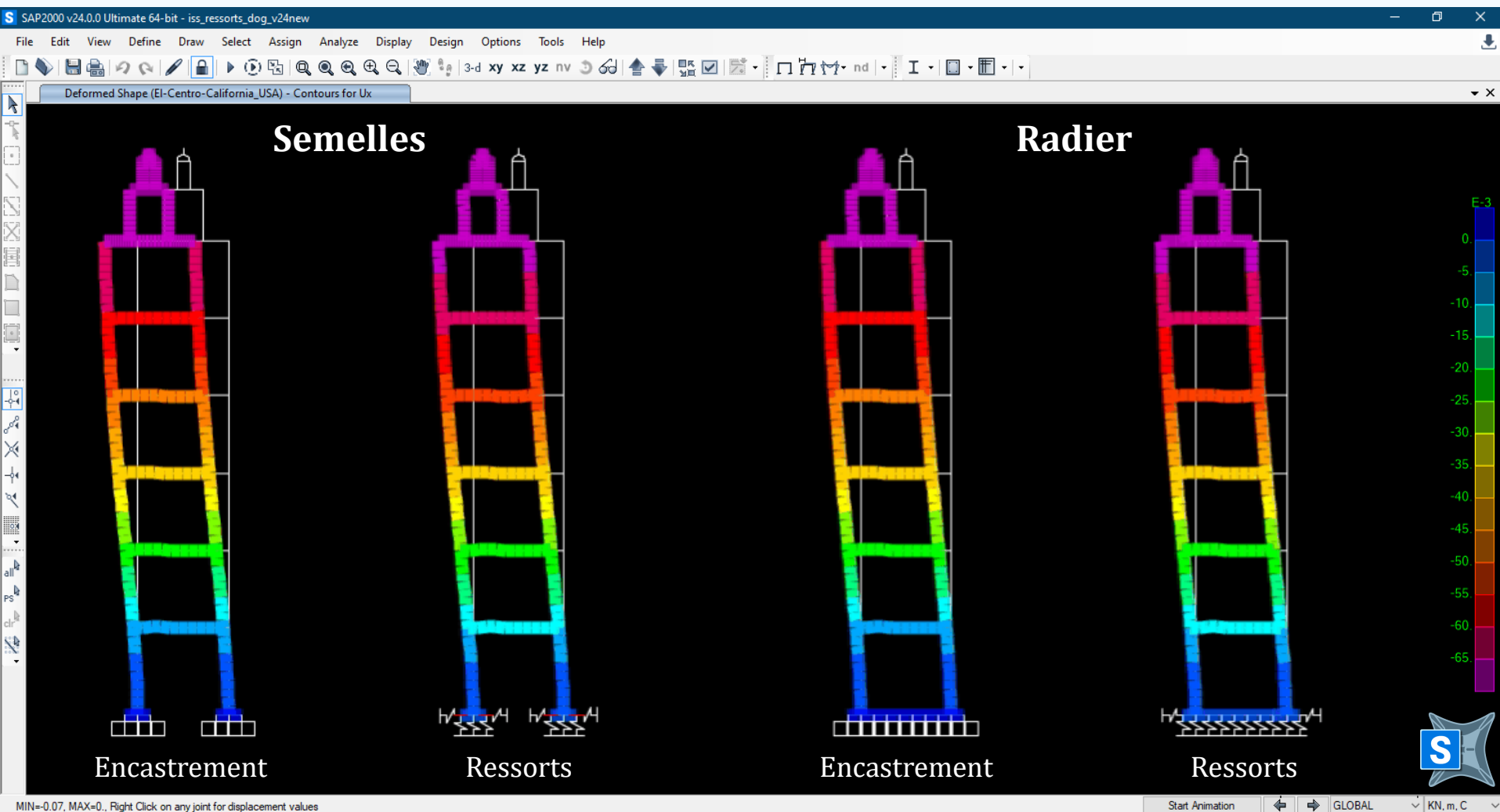
Exemple n° 2 : Modèle de ressorts

- Résultats des calculs : Déformée sous G (Poids propre)**



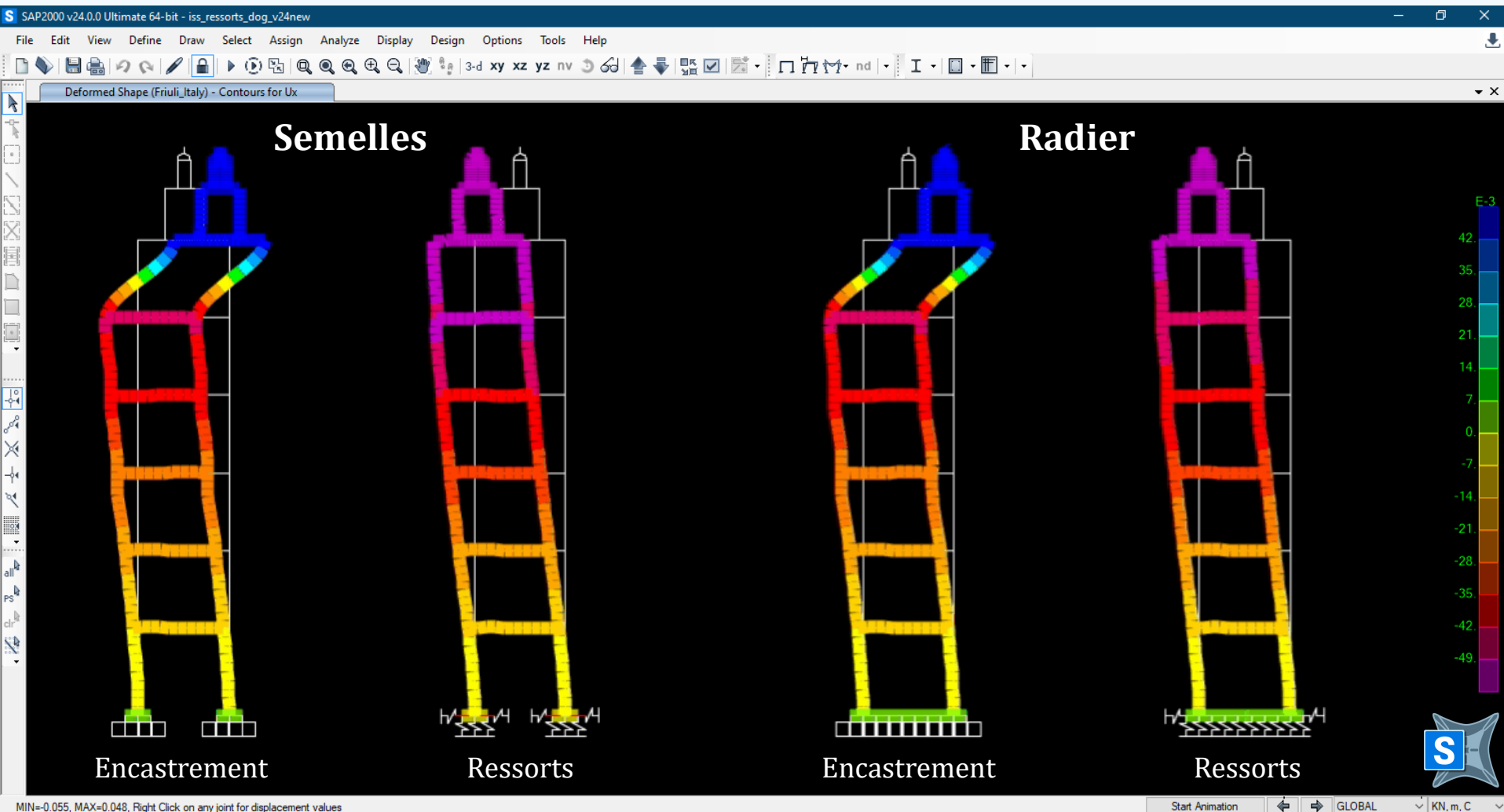
Exemple n° 2 : Modèle de ressorts

- Résultats des calculs : Déformée sous séisme (El-Centro-California, USA)**



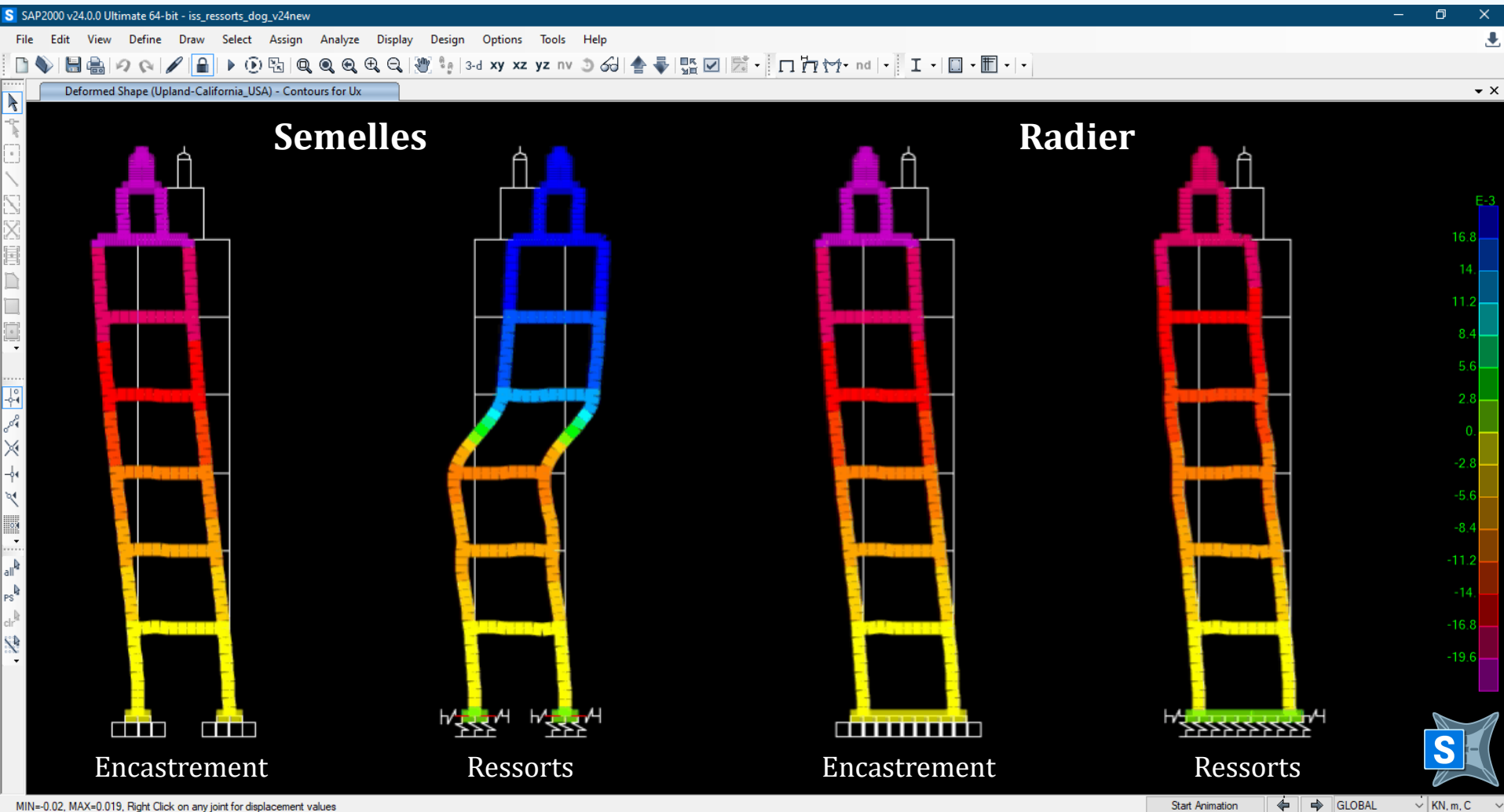
Exemple n° 2 : Modèle de ressorts

- Résultats des calculs : Déformée sous séisme (Friuli, Italie)**



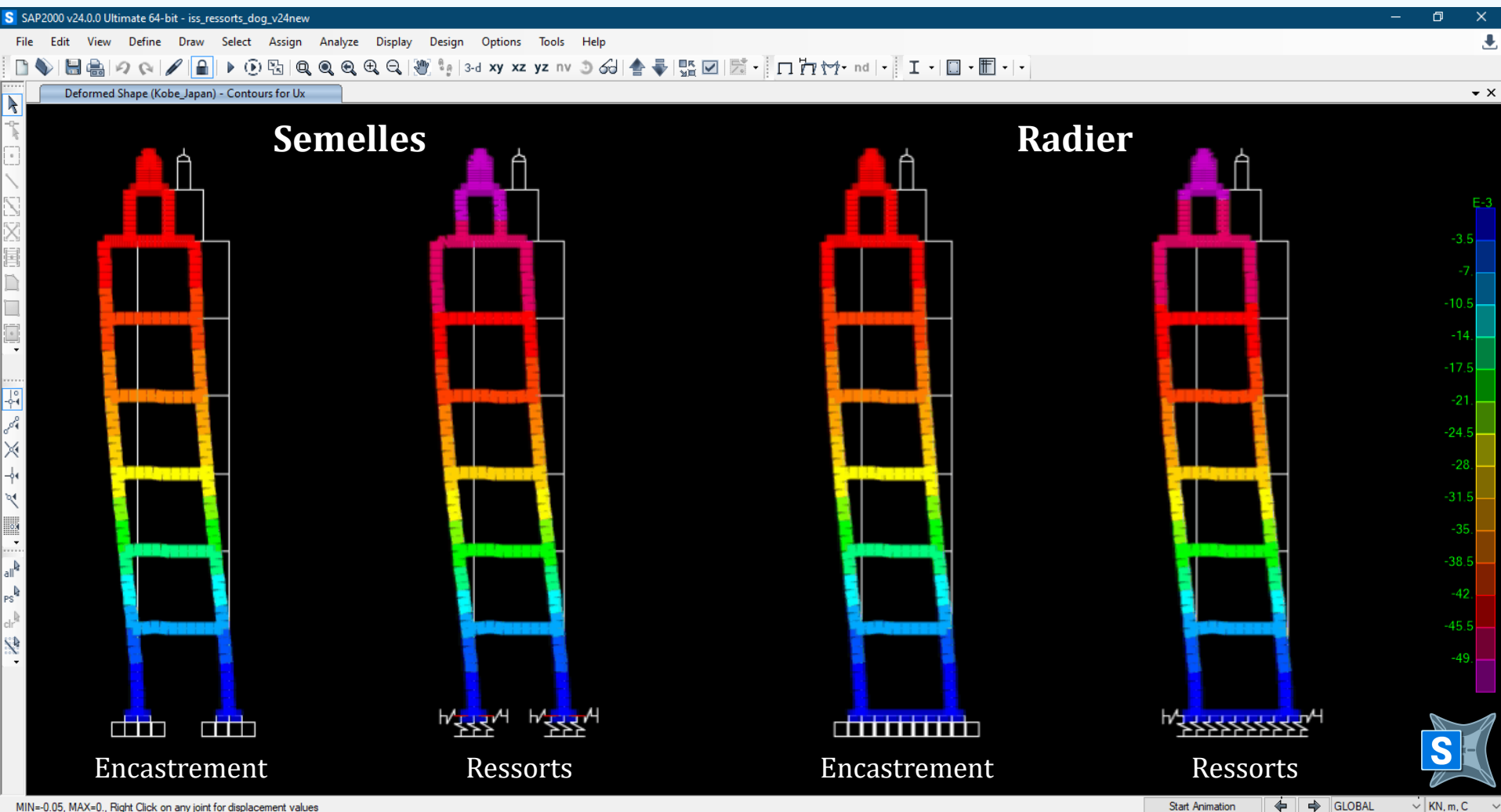
Exemple n° 2 : Modèle de ressorts

- Résultats des calculs : Déformée sous séisme (Upland-California, USA)**



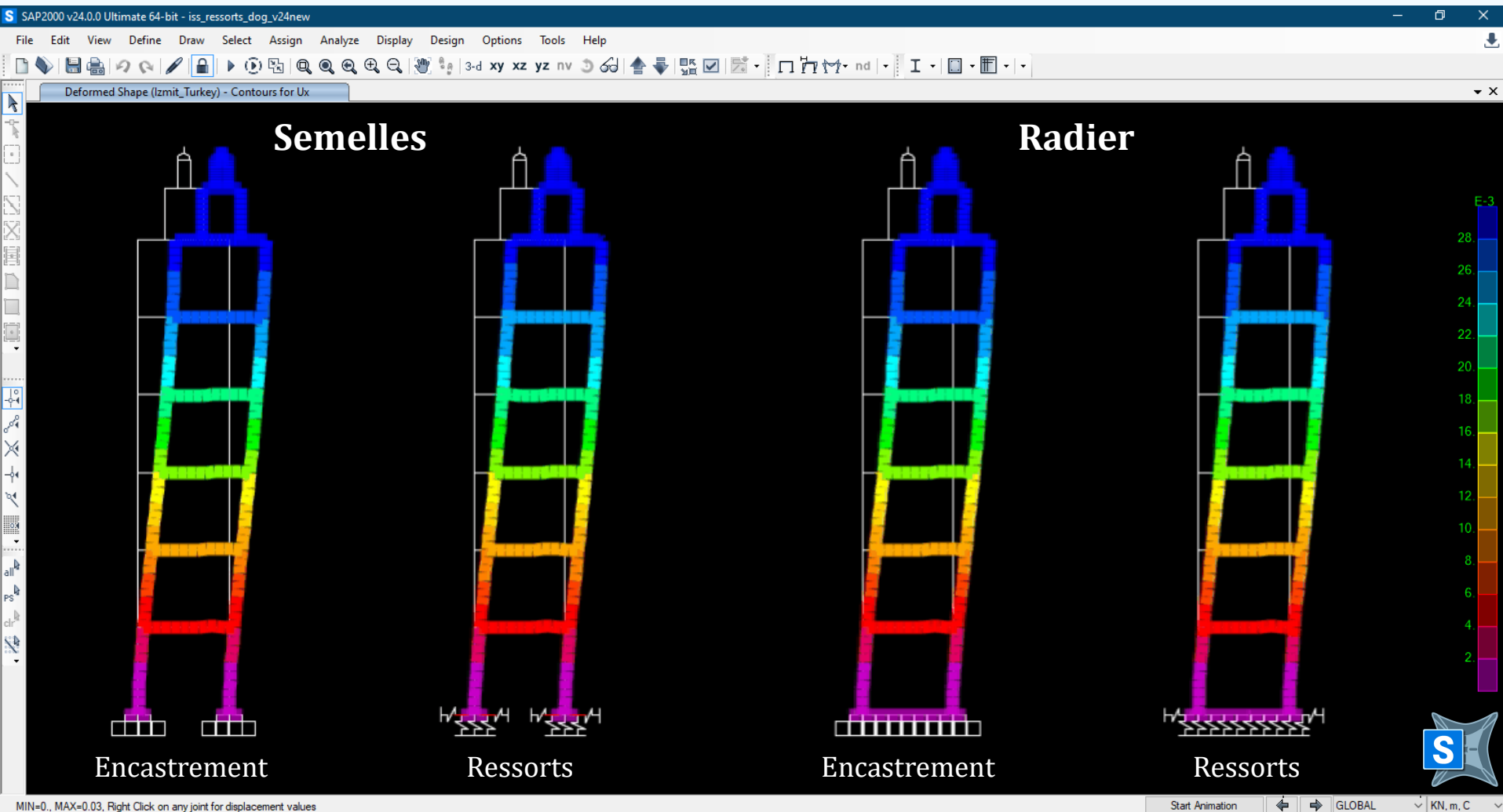
Exemple n° 2 : Modèle de ressorts

- Résultats des calculs : Déformée sous séisme (Kobe, Japon)**



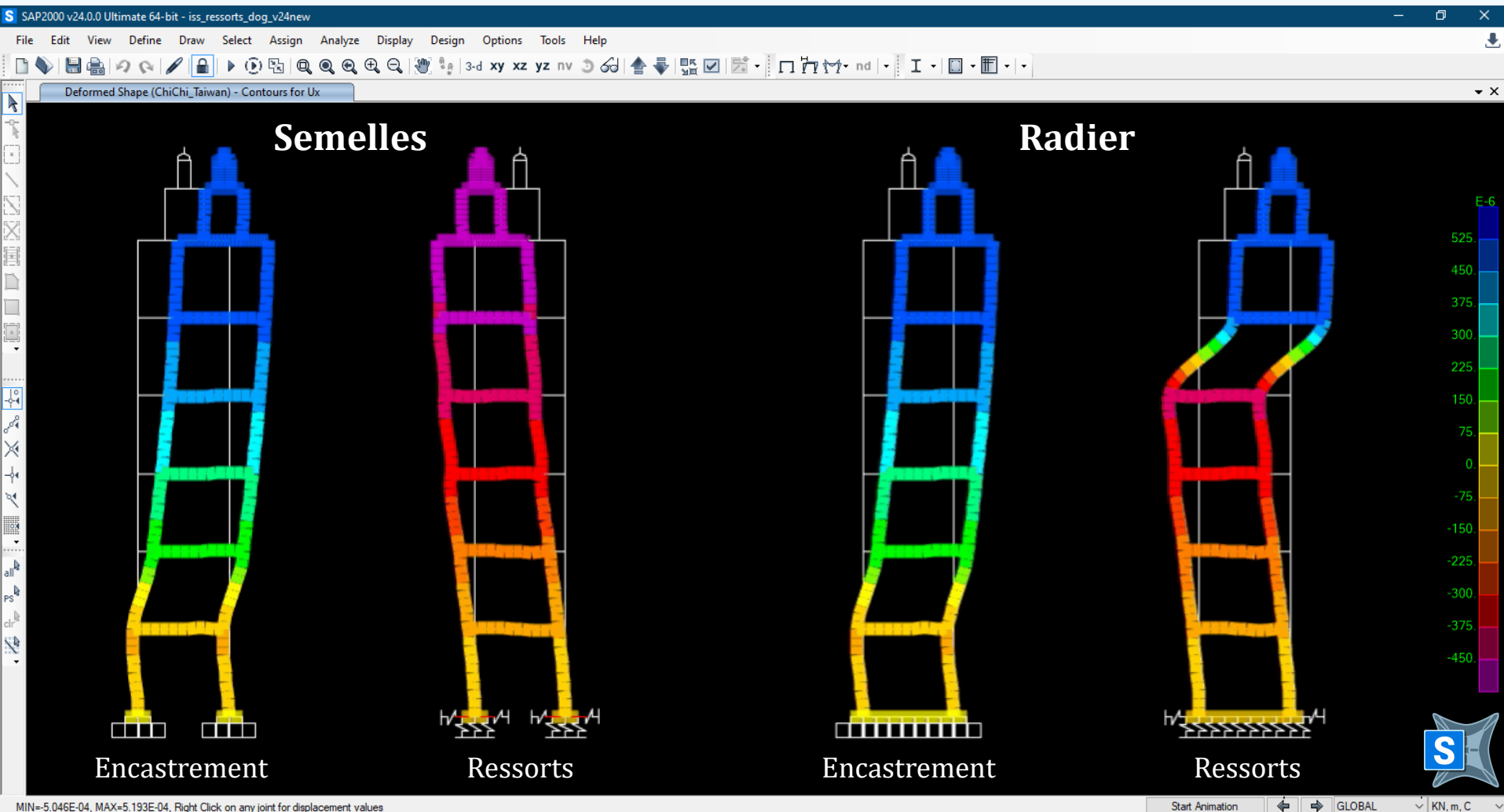
Exemple n° 2 : Modèle de ressorts

- Résultats des calculs : Déformée sous séisme (Izmit, Turquie)**



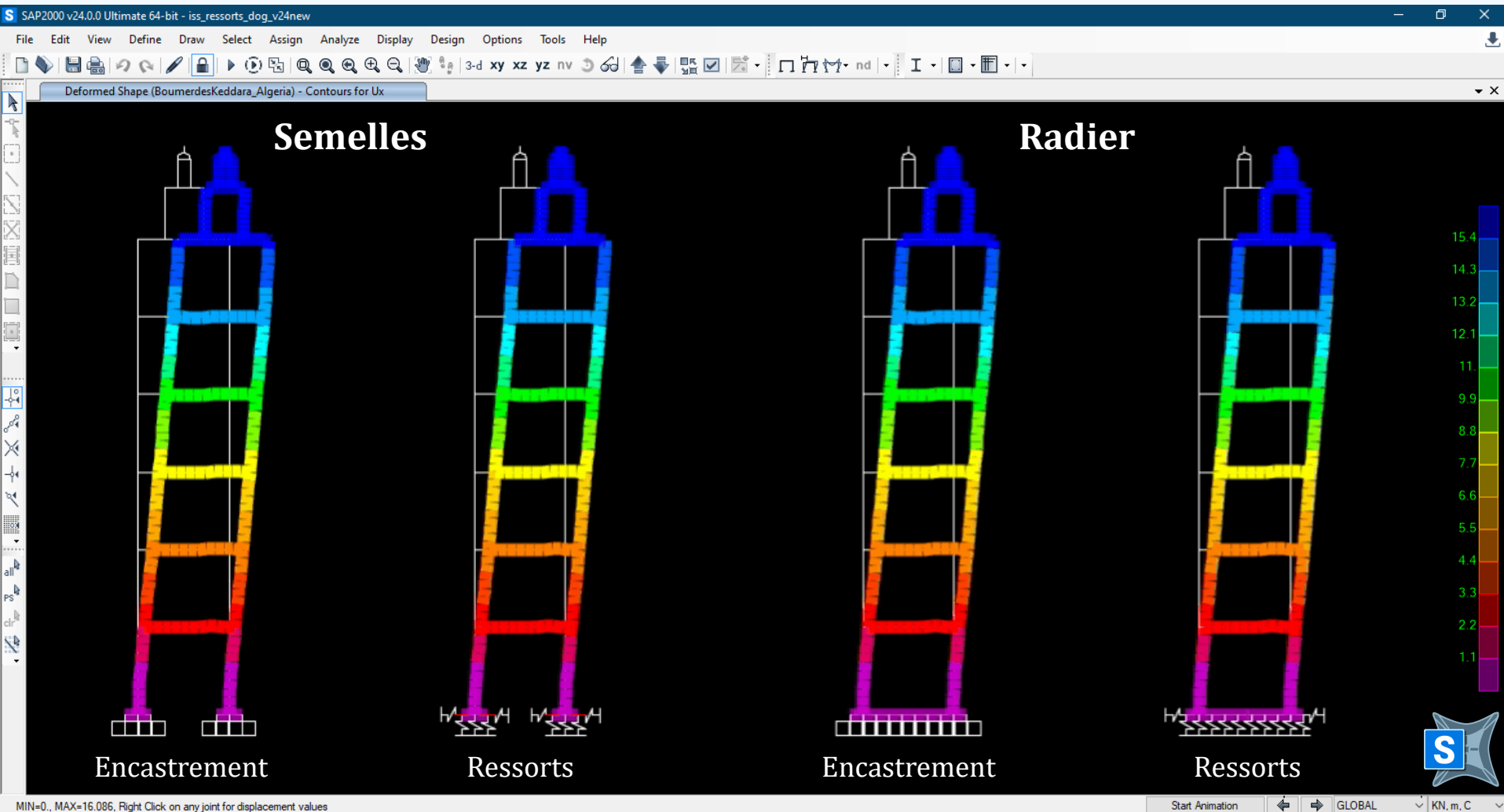
□ Exemple n° 2 : Modèle de ressorts

- **Résultats des calculs : Déformée sous séisme (ChiChi, Taiwan)**



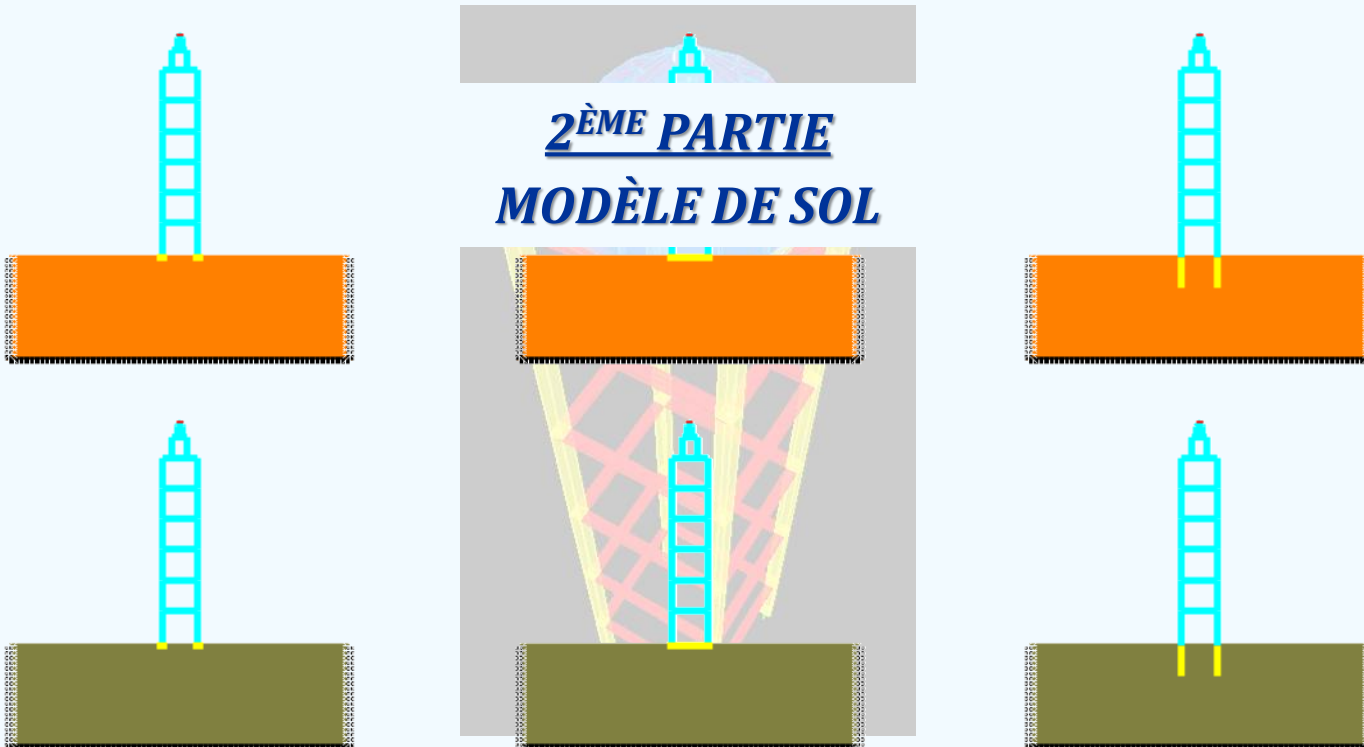
Exemple n° 2 : Modèle de ressorts

- Résultats des calculs : Déformée sous séisme (Boumerdès, Algérie)**



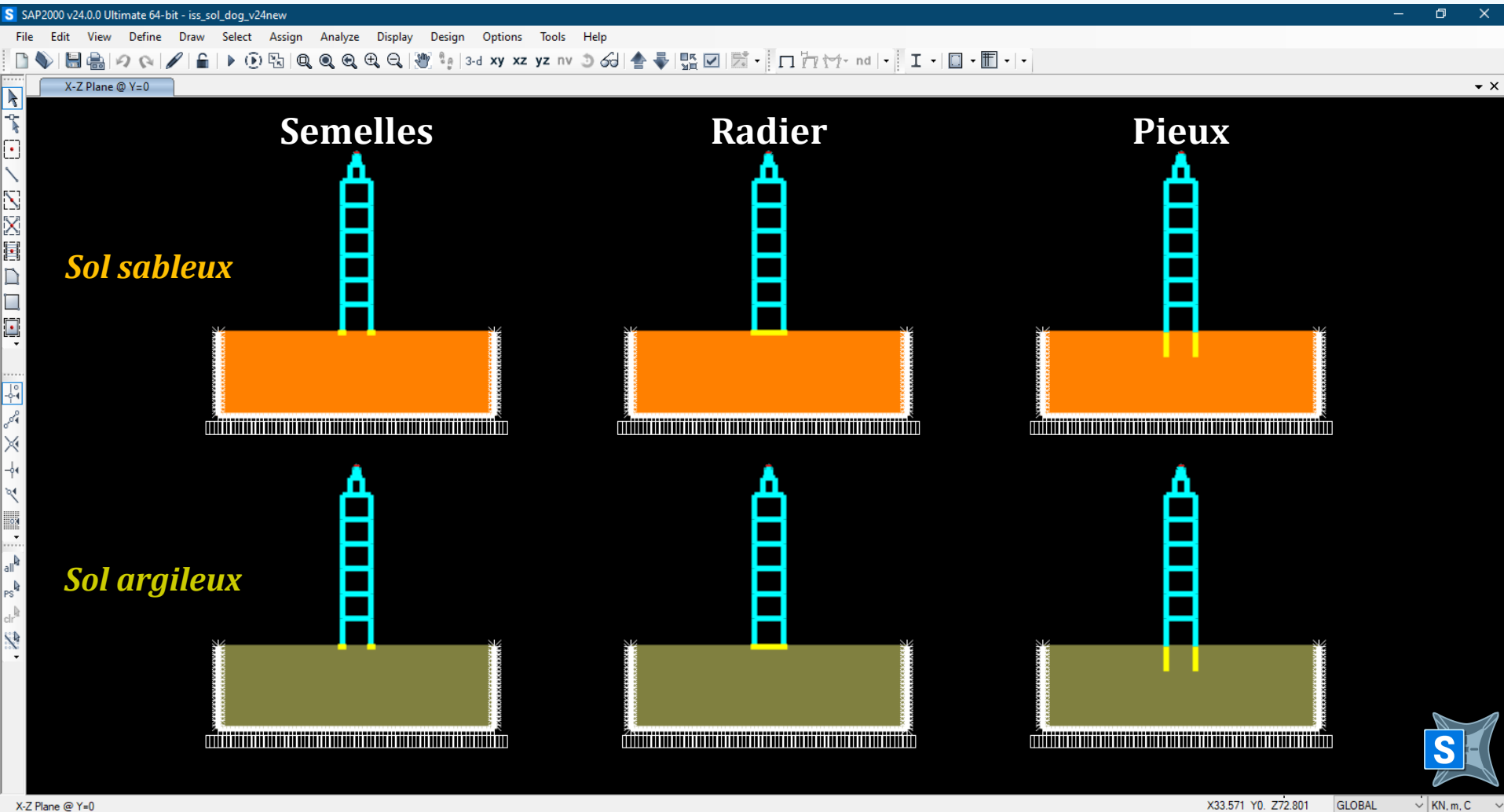


EXEMPLE N° 2 : MINARET



□ Exemple n° 2 : Modèle de sol

- **Configuration géométrique du modèle de calcul**



Exemple n° 2 : Modèle de sol

- Caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés : Béton & Acier**

SAP2000 v24

S Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: Béton

Material Type: Concrete

Material Grade: fc28

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 24.

Mass per Unit Volume: 2.4473

Units: KN, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 32164195.

Poisson, U: 0.2

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 9.900E-06

Shear Modulus, G: 13401748.

Other Properties For Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, fc: 19613.3

Expected Concrete Compressive Strength: 19613.3

☐ Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor:

S Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: Acier

Material Type: Steel

Material Grade: S355

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 76.9729

Mass per Unit Volume: 7.849

Units: KN, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 2.100E+08

Poisson, U: 0.3

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 1.170E-05

Shear Modulus, G: 80769231.

Other Properties For Steel Materials

Minimum Yield Stress, Fy: 355000.

Minimum Tensile Stress, Fu: 510000.

Expected Yield Stress, Fye: 390500.

Expected Tensile Stress, Fue: 561000.

Exemple n° 2 : Modèle de sol

Caractéristiques géotechniques des sols de fondation : Sable & Argile

SAP2000 v24

S Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: Sol_Sableux

Material Type: Soil

Material Grade:

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 15.

Mass per Unit Volume: 1.5296

Units: KN, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 52000.

Poisson, U: 0.3

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 9.900E-06

Shear Modulus, G: 20000.

Other Properties for Soil Materials

Soil Type: Sand

Cohesion: 0.1

Friction Angle (deg): 30.

S Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: Sol_Argileux

Material Type: Soil

Material Grade:

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 20.

Mass per Unit Volume: 2.0394

Units: KN, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 112000.

Poisson, U: 0.4

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 9.900E-06

Shear Modulus, G: 40000.

Other Properties for Soil Materials

Soil Type: Clay

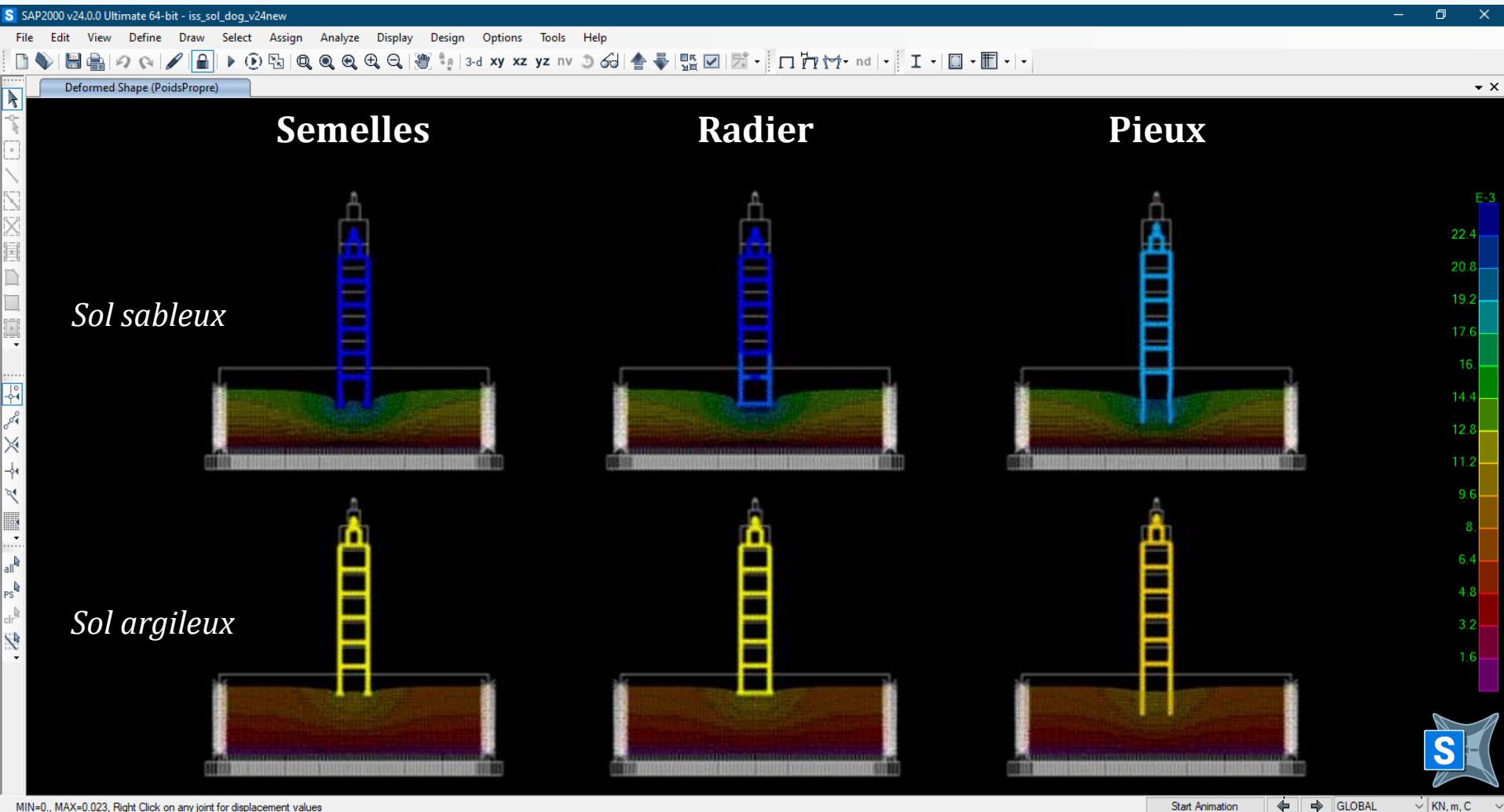
Cohesion: 50.

Friction Angle (deg): 0.



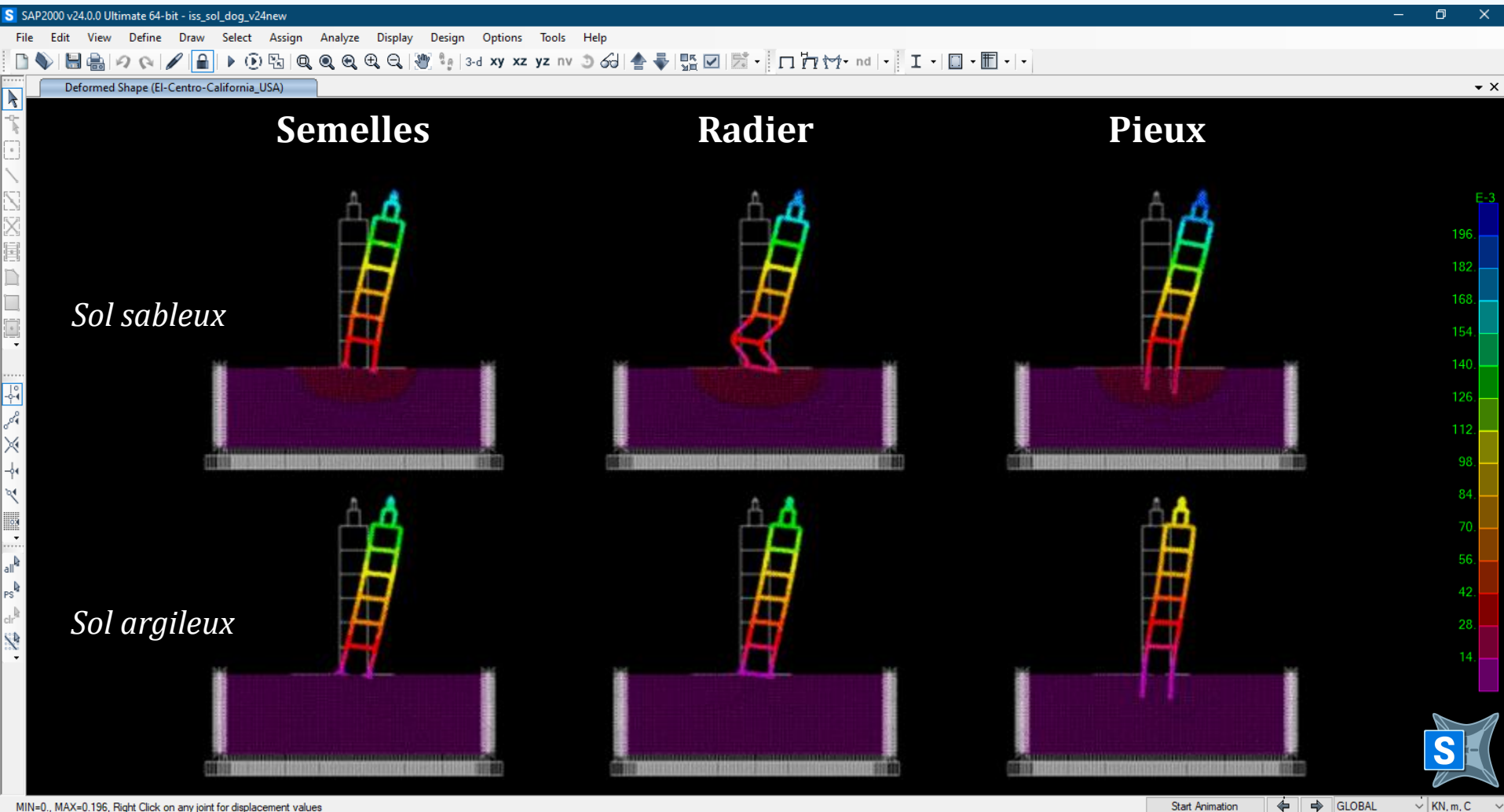
Exemple n° 2 : Modèle de sol

- Résultats des calculs : Déformée sous G (Poids propre)**



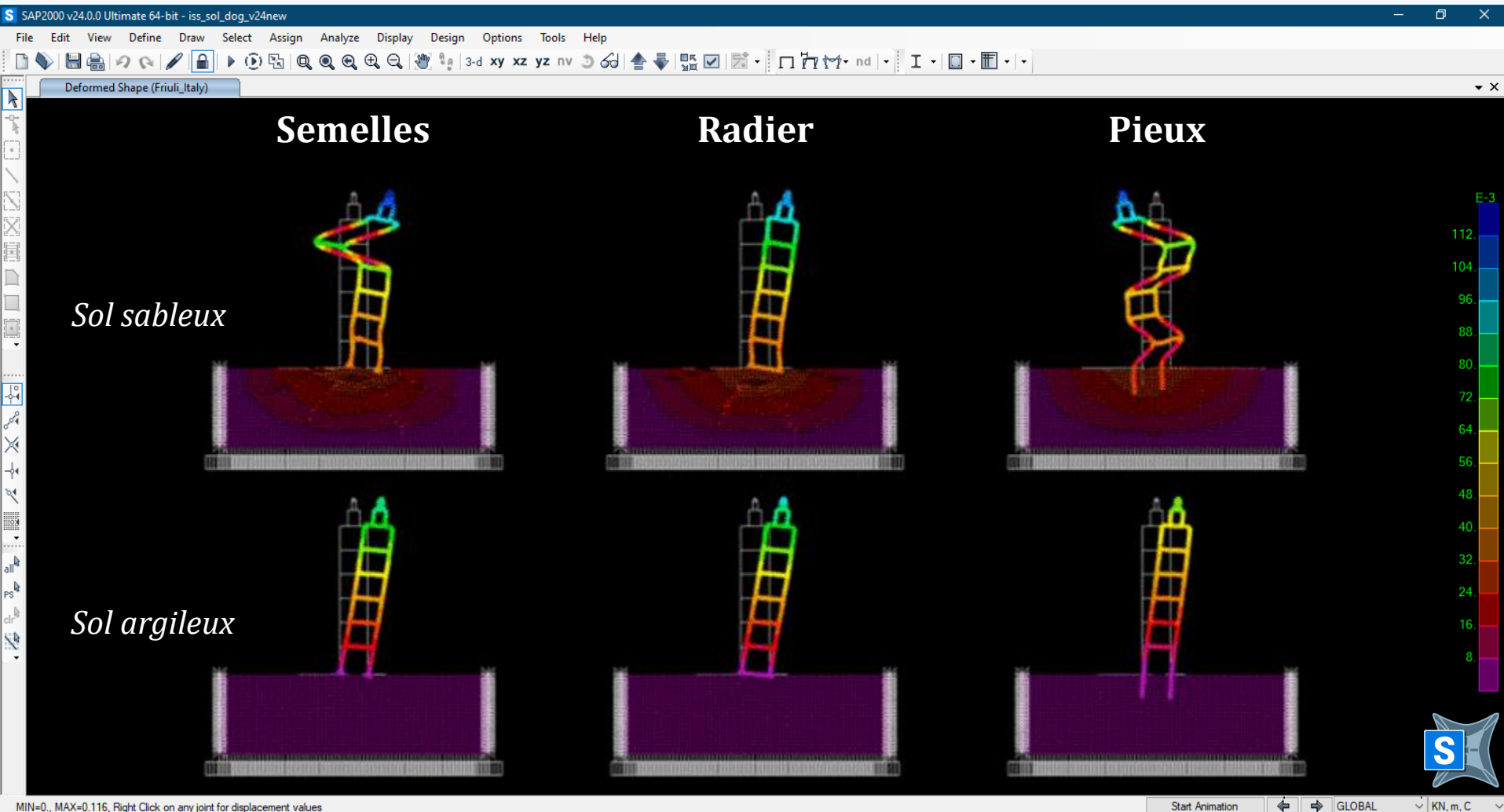
Exemple n° 2 : Modèle de sol

- Résultats des calculs : Déformée sous séisme (El-Centro-California, USA)**



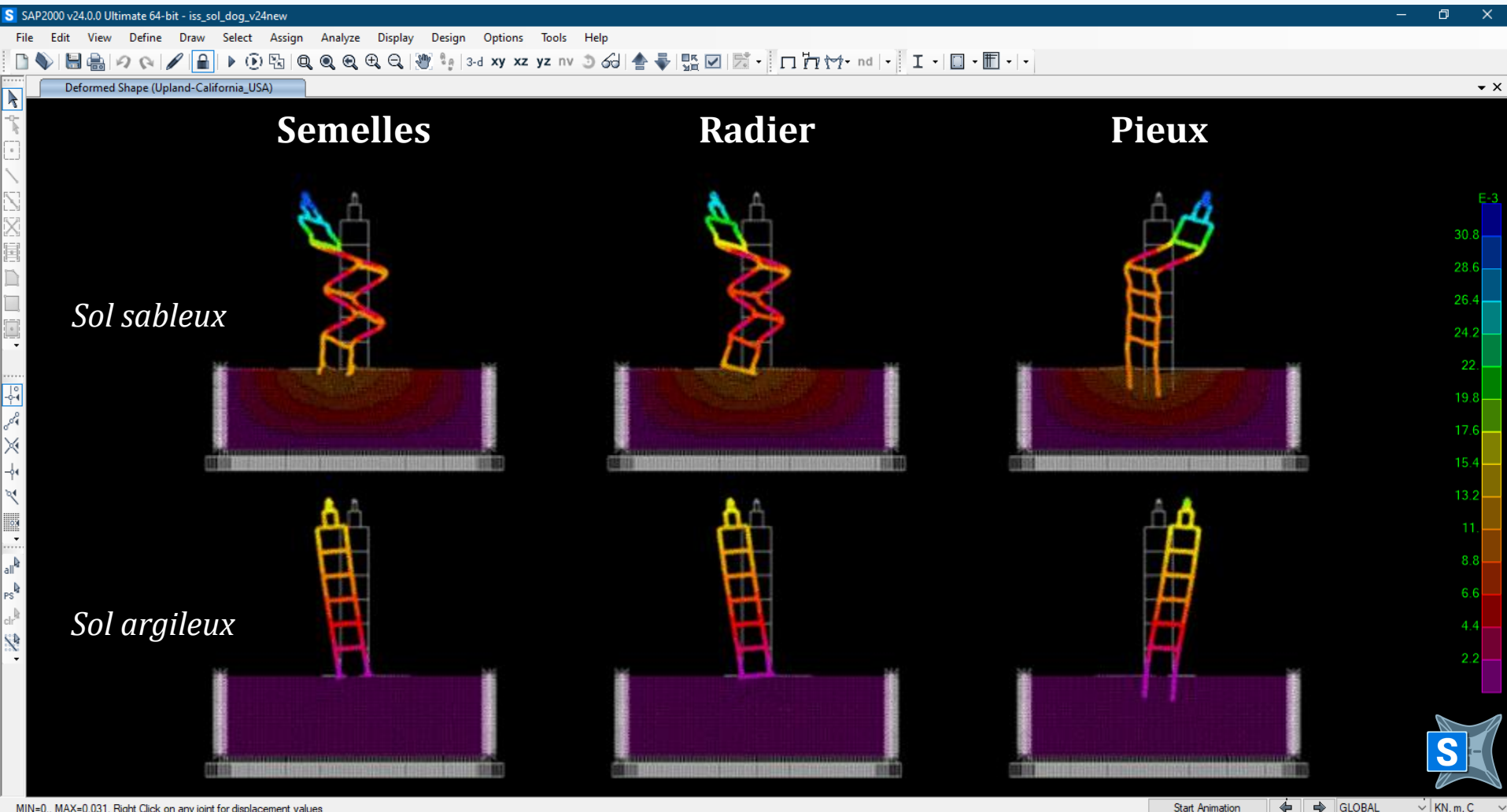
□ Exemple n° 2 : Modèle de sol

- **Résultats des calculs : Déformée sous séisme (Friuli, Italie)**



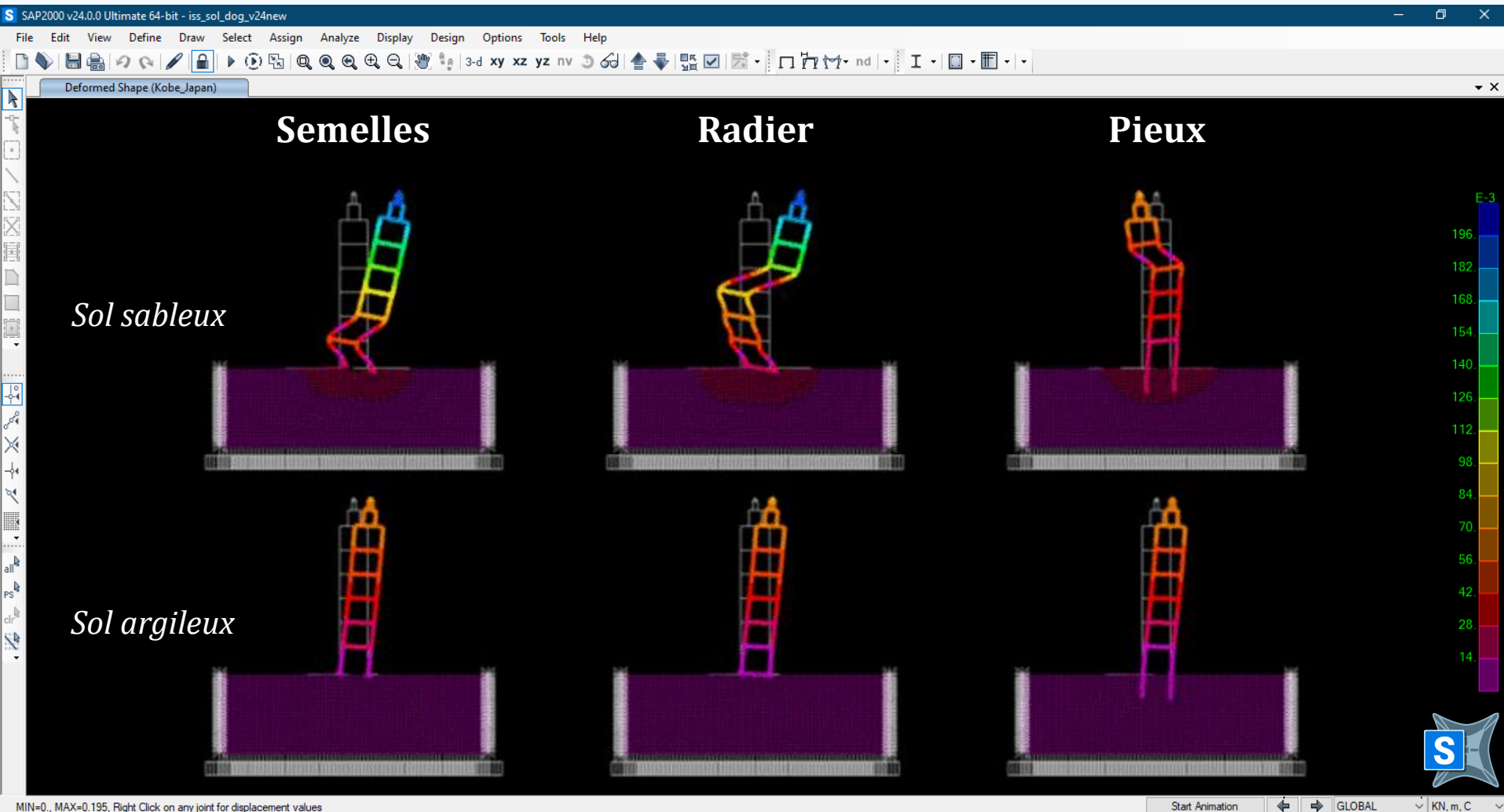
□ Exemple n° 2 : Modèle de sol

- **Résultats des calculs : Déformée sous séisme (Upland-California, USA)**



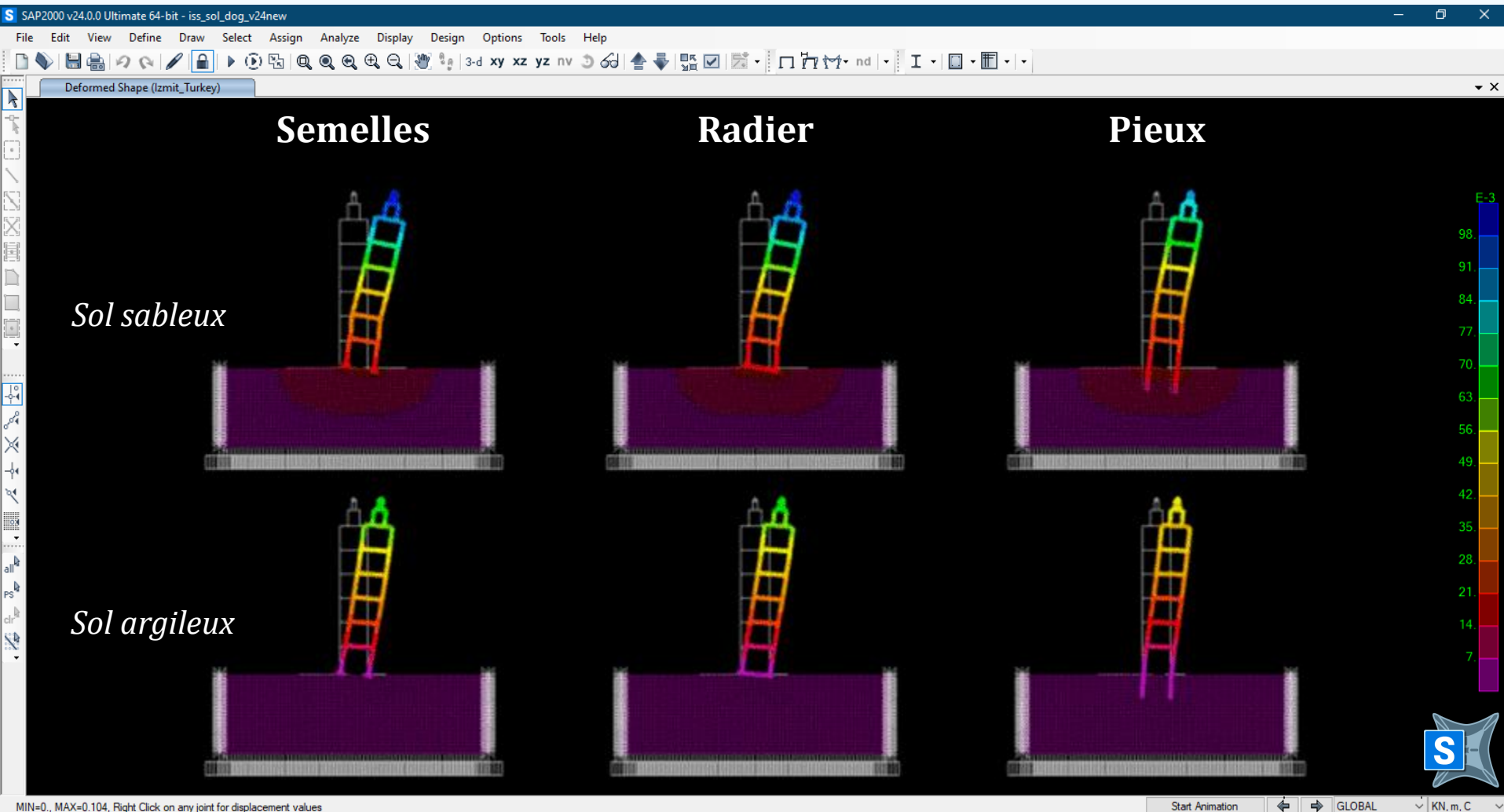
Exemple n° 2 : Modèle de sol

- Résultats des calculs : Déformée sous séisme (Kobe, Japon)**



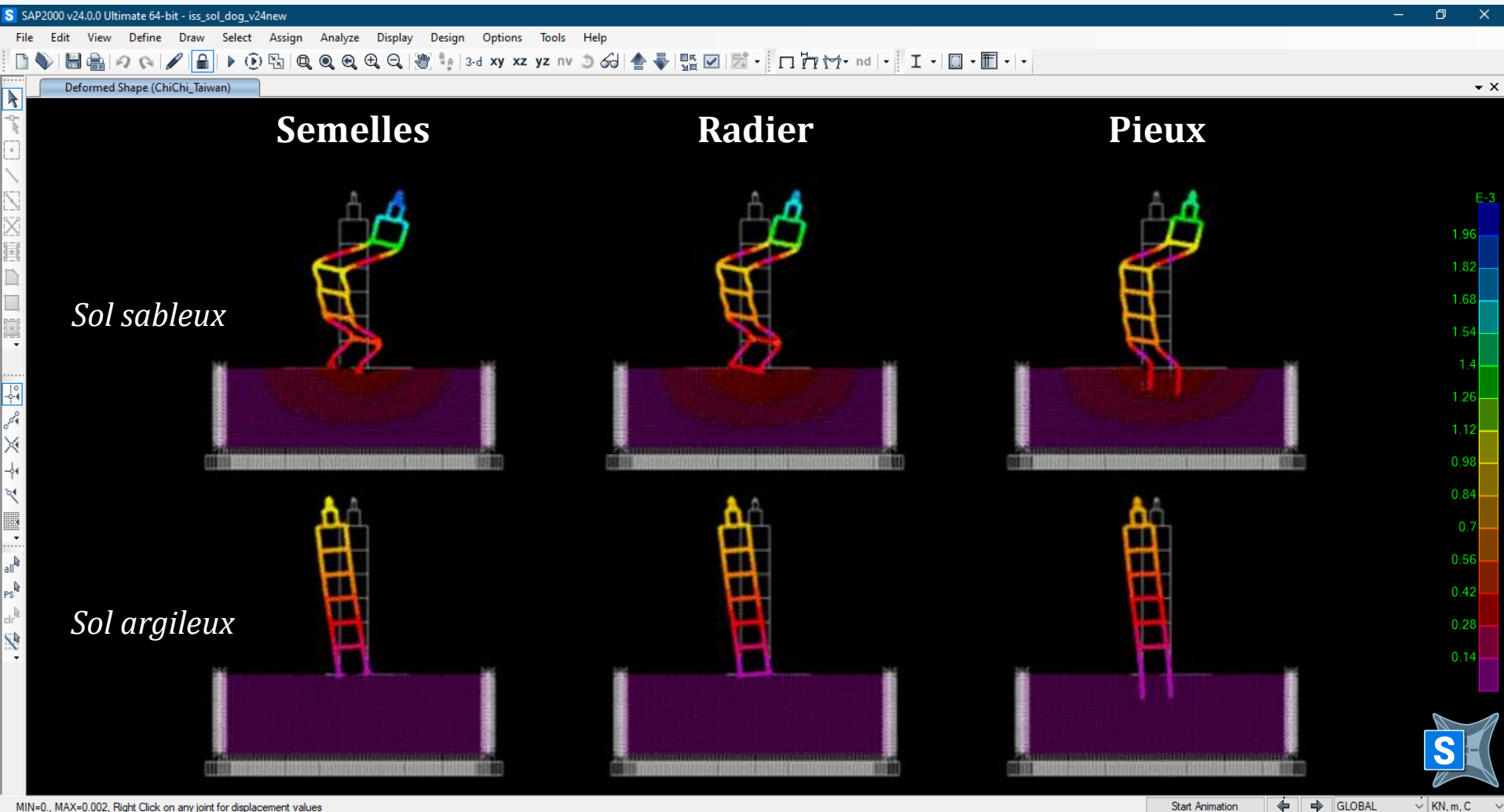
Exemple n° 2 : Modèle de sol

- Résultats des calculs : Déformée sous séisme (Izmit, Turquie)**



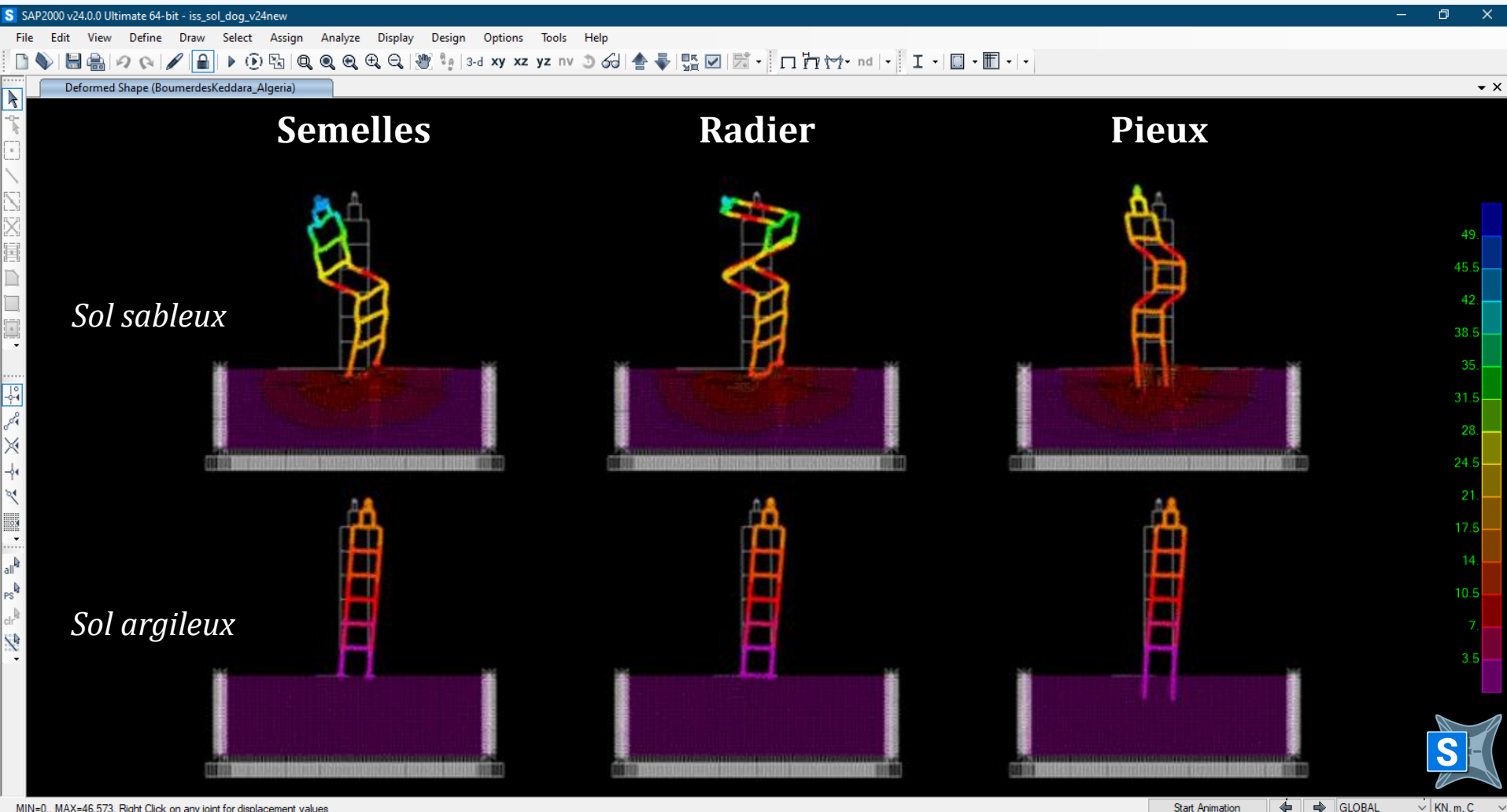
□ Exemple n° 2 : Modèle de sol

- **Résultats des calculs : Déformée sous séisme (ChiChi, Taiwan)**



□ Exemple n° 2 : Modèle de sol

- **Résultats des calculs : Déformée sous séisme (Boumerdès, Algérie)**



TRAVAIL PERSONNEL

Voir Cours

« **Modélisation des ouvrages géotechniques (TP)** »
M2/S3

Merci de votre attention

Fin du Chapitre Premier