

Webinaire « Fondations mixtes »

Modélisation aux Éléments Finis

Plan de la présentation

Modélisation en éléments finis (EF) :

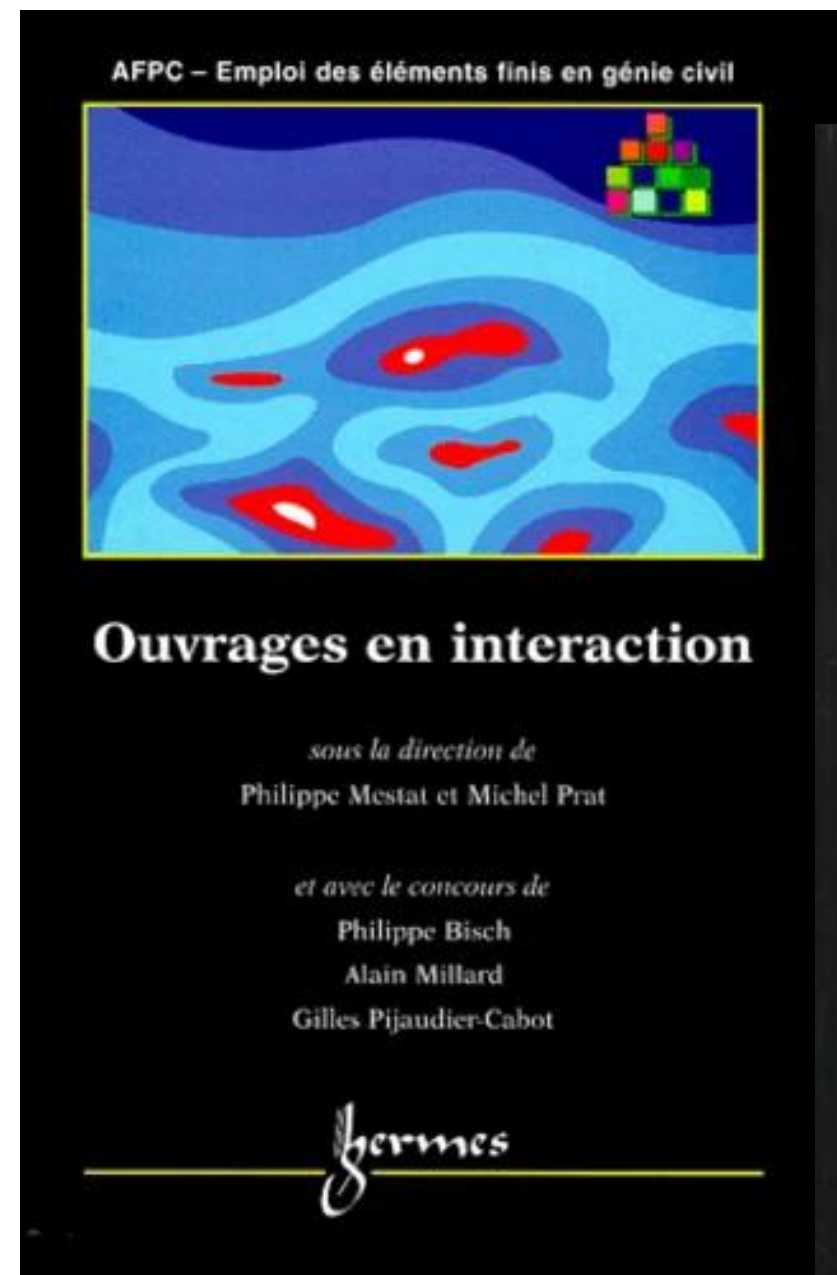
- étapes de modélisation
- quelle est la question à laquelle on souhaite répondre ? // quel objectif de la modélisation ?
- quelle « stratégie » adoptée pour la modélisation ?

Exemple d'un ouvrage construit sur sols compressibles

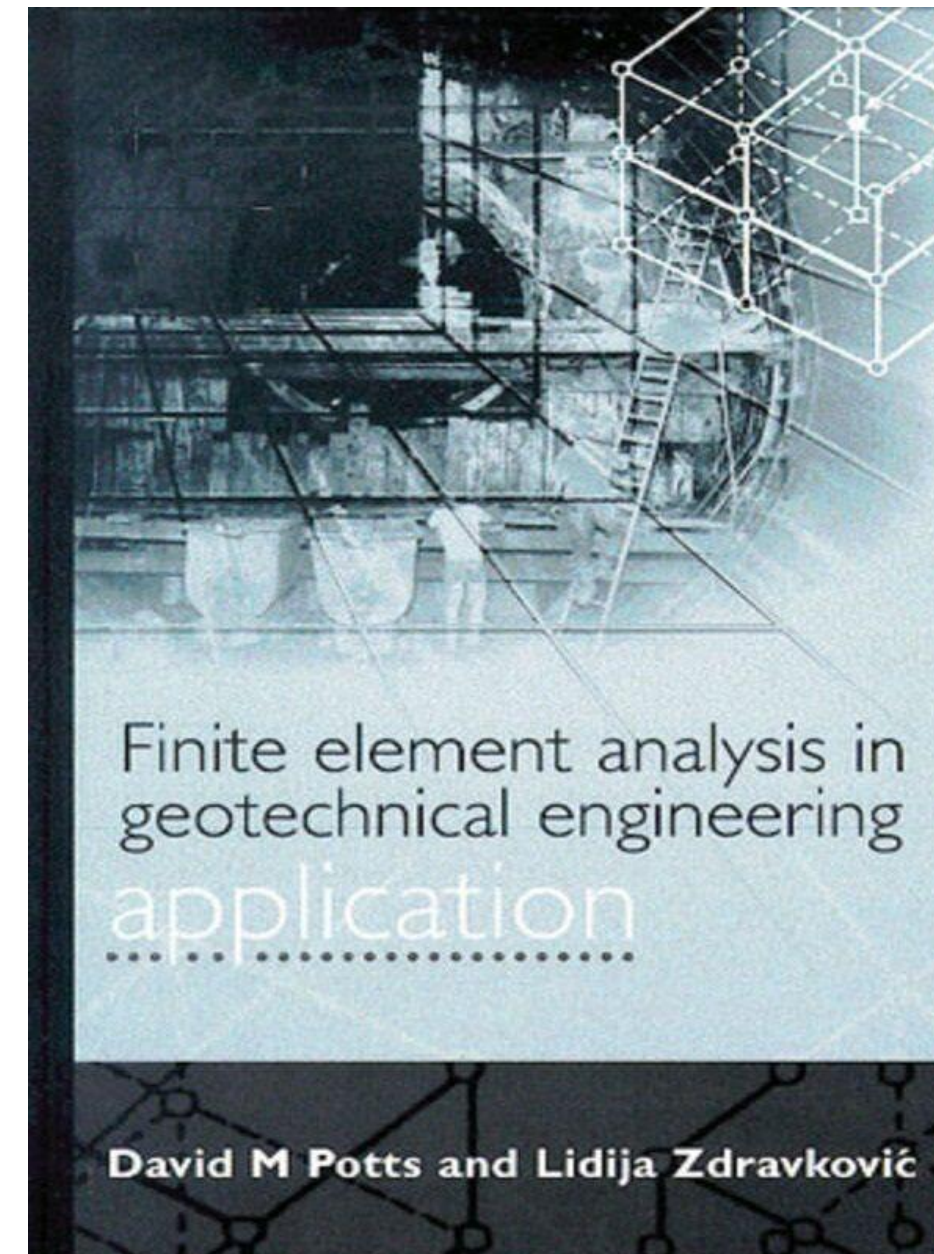
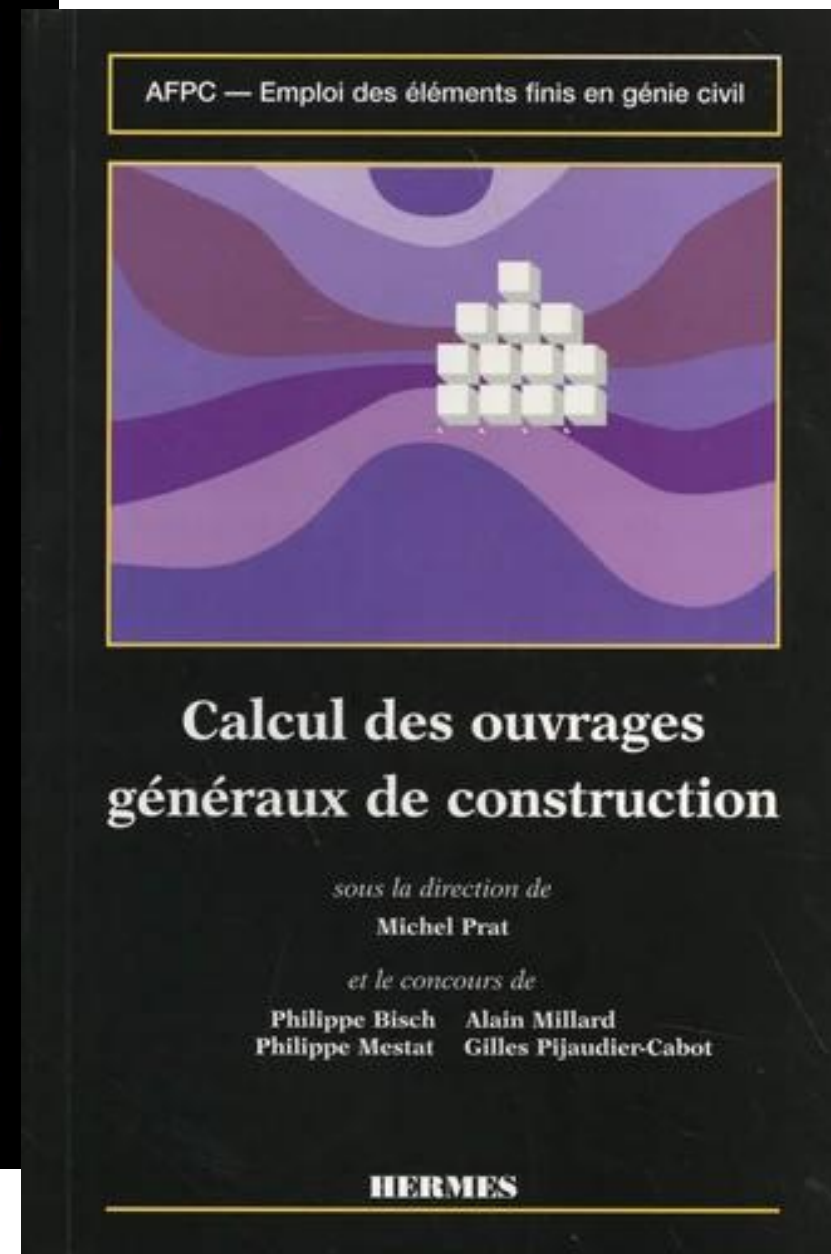
- quelques données sur le projet
- historique du site
- profil géotechnique, caractéristiques de calcul retenues
- étapes de modélisation en EF et quelques résultats :
 - tassement et consolidation en « champ libre »,
 - modélisation des essais des pieux,
 - modèles en éléments finis simplifié (modèle « unitaire ») vs calculs 3D

Conclusions

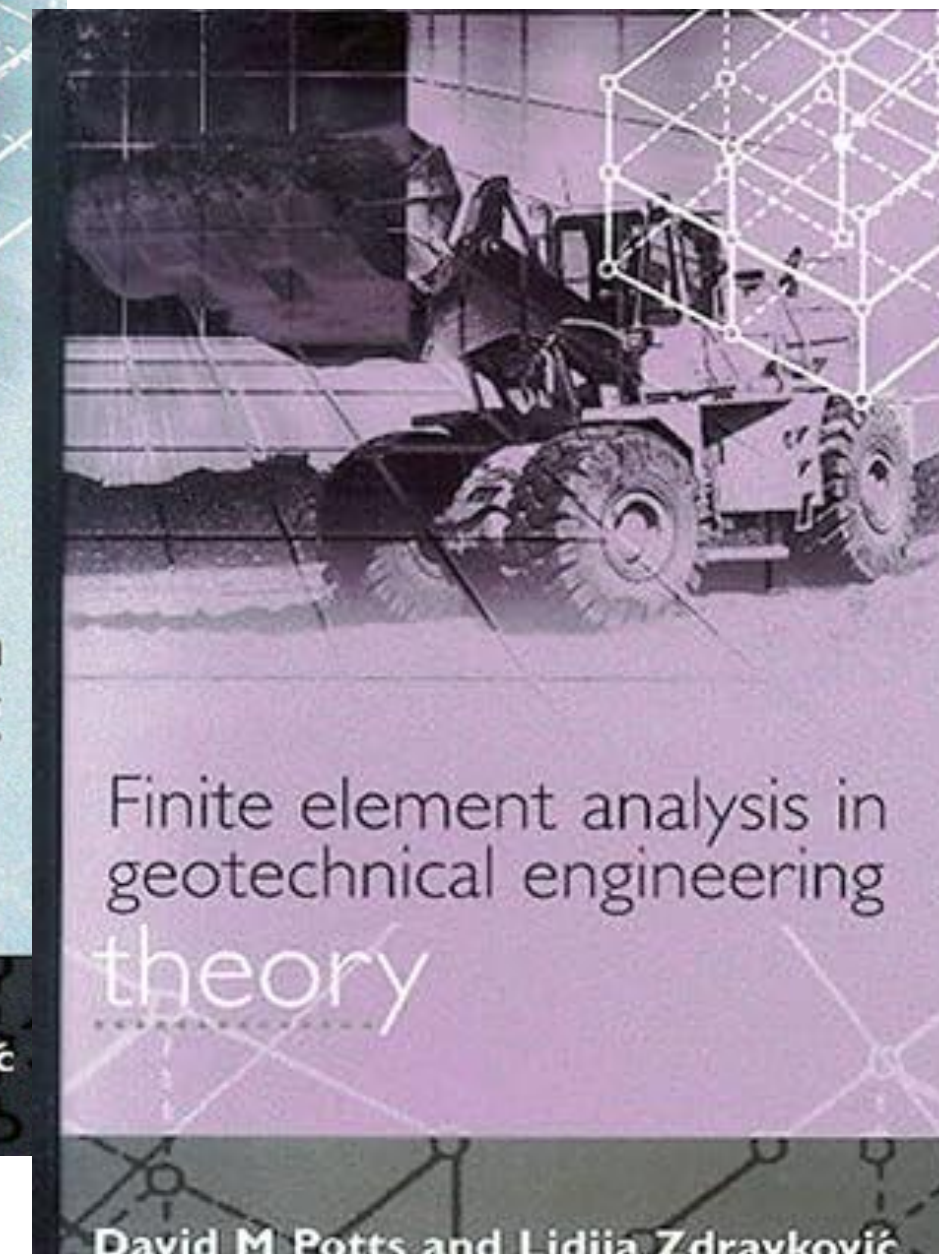
Modélisation en éléments finis : les étapes



ouvrages parus en ... 1999



ouvrages parus en ... 1999



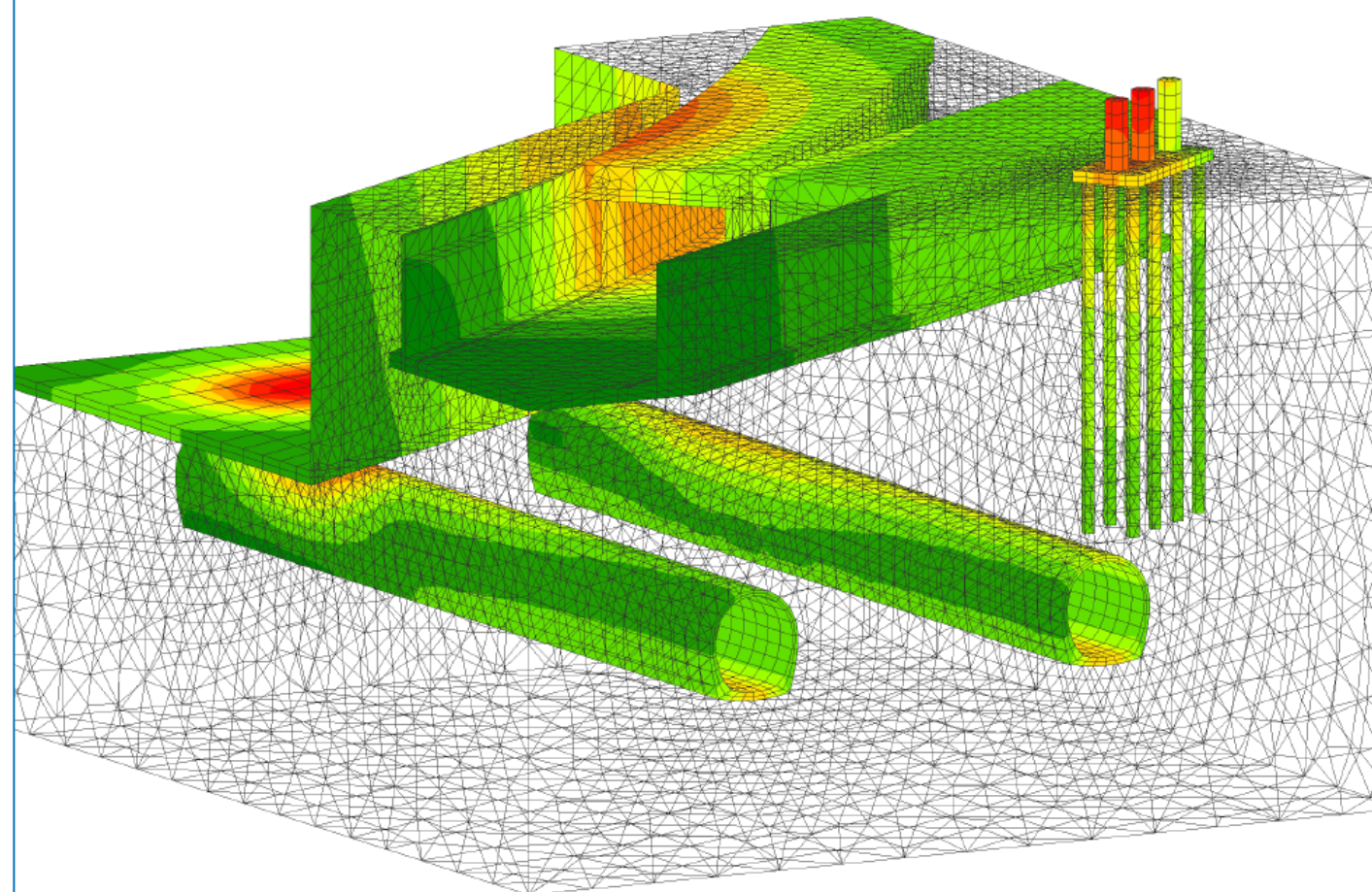
et 2023

Mais, certainement, il doit y avoir au moins quelques centaines (... !!) d'autres ouvrages sur les Eléments Finis en Géotechnique, et ce depuis la fin de années 1950 !

Modélisation en éléments finis : les étapes



RECOMMANDATIONS POUR LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES OUVRAGES GÉOTECHNIQUES



2023
VERSION FRANÇAISE

1 CONSTRUCTION DU MODÈLE

1.1 INTRODUCTION

1.2 CHOIX DU TYPE D'ANALYSE

1.3 HYPOTHÈSES GÉOMÉTRIQUES

1.4 ÉTAT INITIAL DES CONTRAINTES

1.5 PRISE EN COMPTE DU PHASAGE DE CONSTRUCTION

1.6 MODÉLISATION DES STRUCTURES

1.7 SYNTHÈSE

1.8 RÉFÉRENCES

Il est [...] primordial de bien cerner l'objectif du calcul avant de mettre en place les différents éléments d'une modélisation numérique.

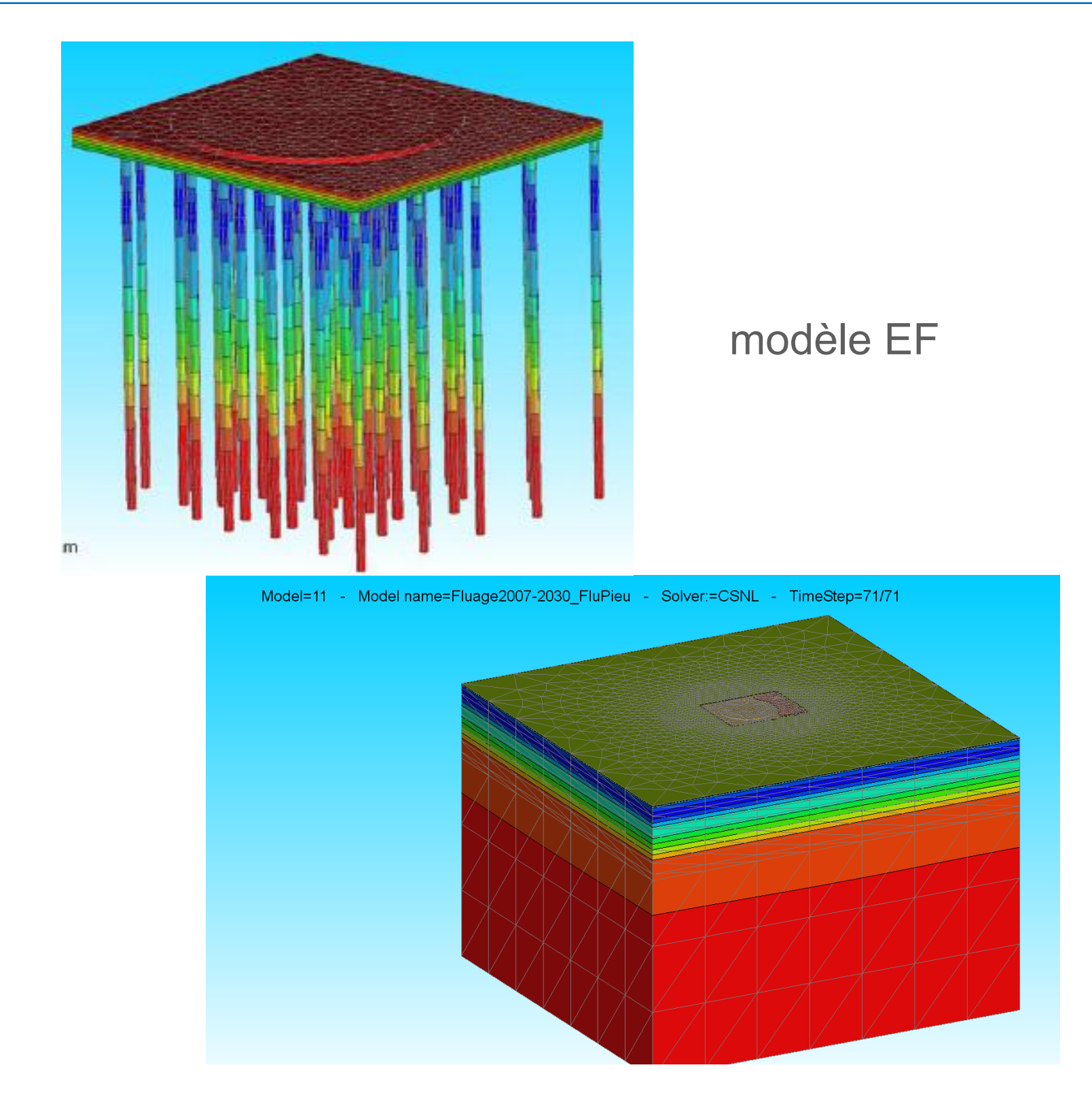
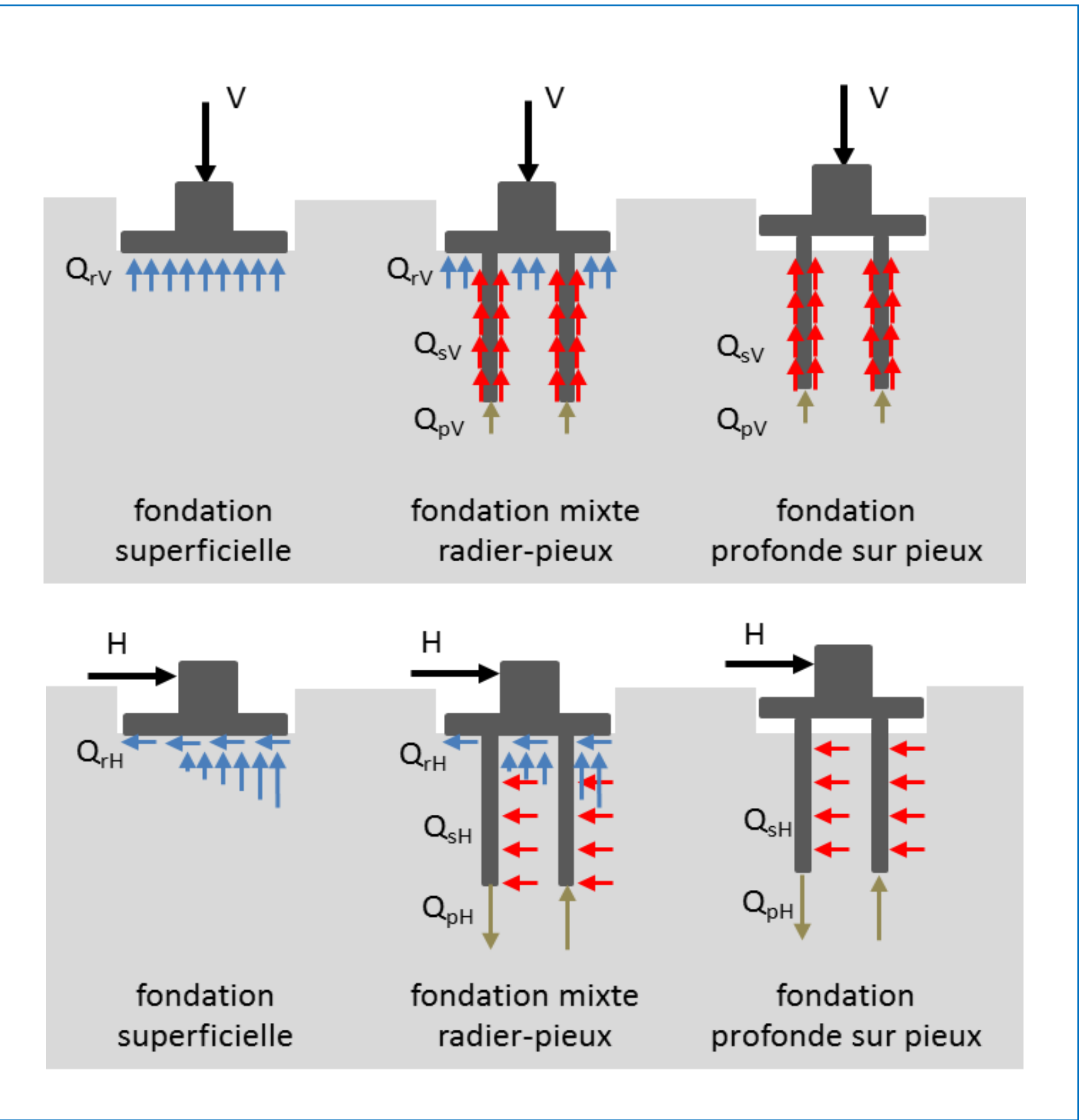
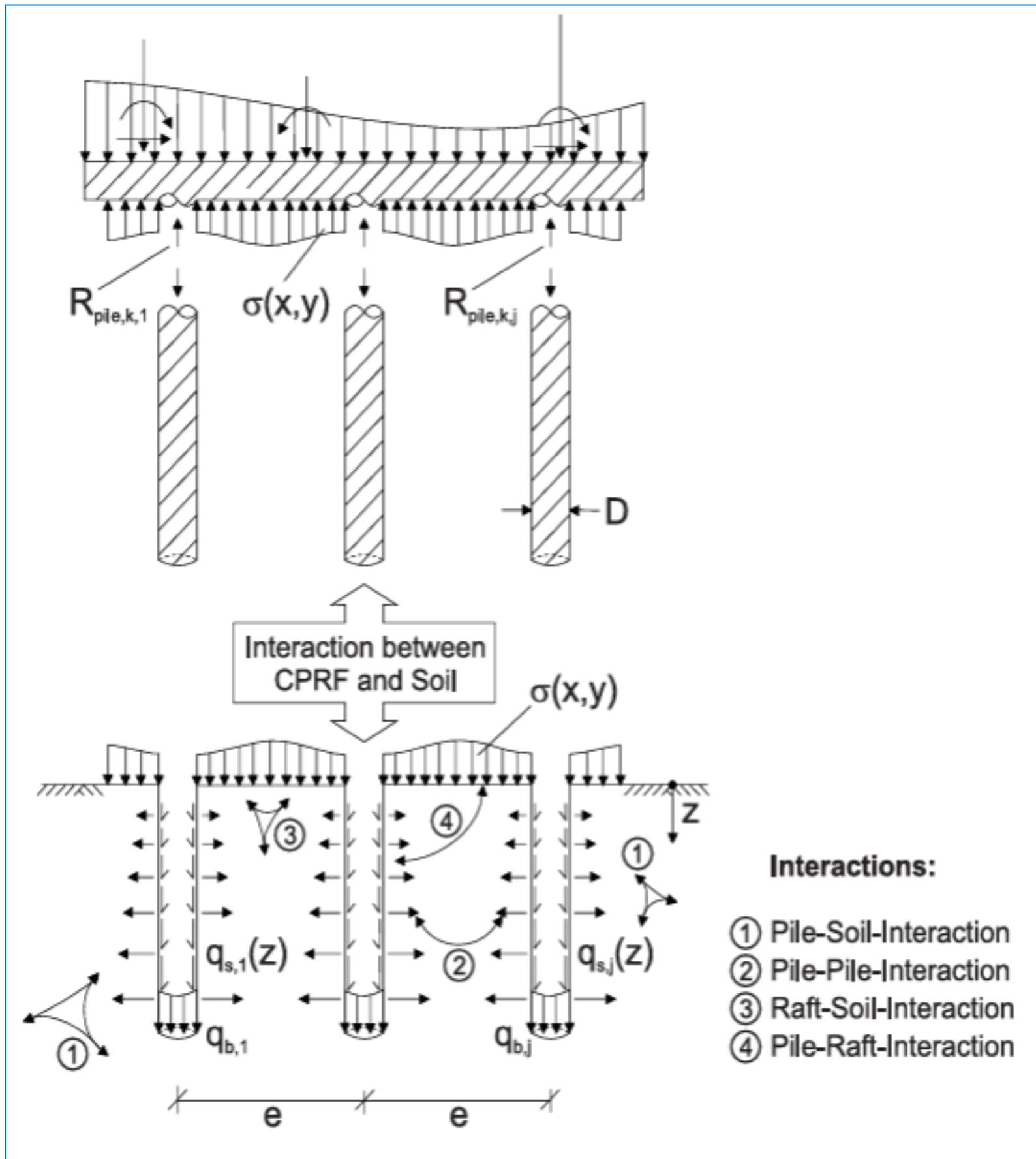
De manière générale, les modélisations numériques peuvent avoir pour but :

- de vérifier un dimensionnement vis-à-vis d'états limites de service ou d'états limites ultimes ;
- de justifier une variante de construction ;
- de fournir des éléments pour interpréter le comportement observé d'un ouvrage.

Dans ce dernier cas, on fait des hypothèses sur les phénomènes responsables de ce comportement, et la modélisation vise à démontrer la pertinence de ces hypothèses, et à servir de base à des solutions de confortement.

[extrait du Chapitre 1]

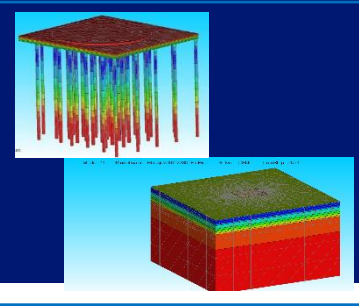
Modélisation en éléments finis / objectifs de la modélisation cas d'une fondation mixte



Katzenbach, Choudhury (2013) ;
schéma présent dans différentes publications

Borel (2001) ; Droniuc et al. (2018)

Modélisation en éléments finis / objectifs de la modélisation cas d'une fondation mixte

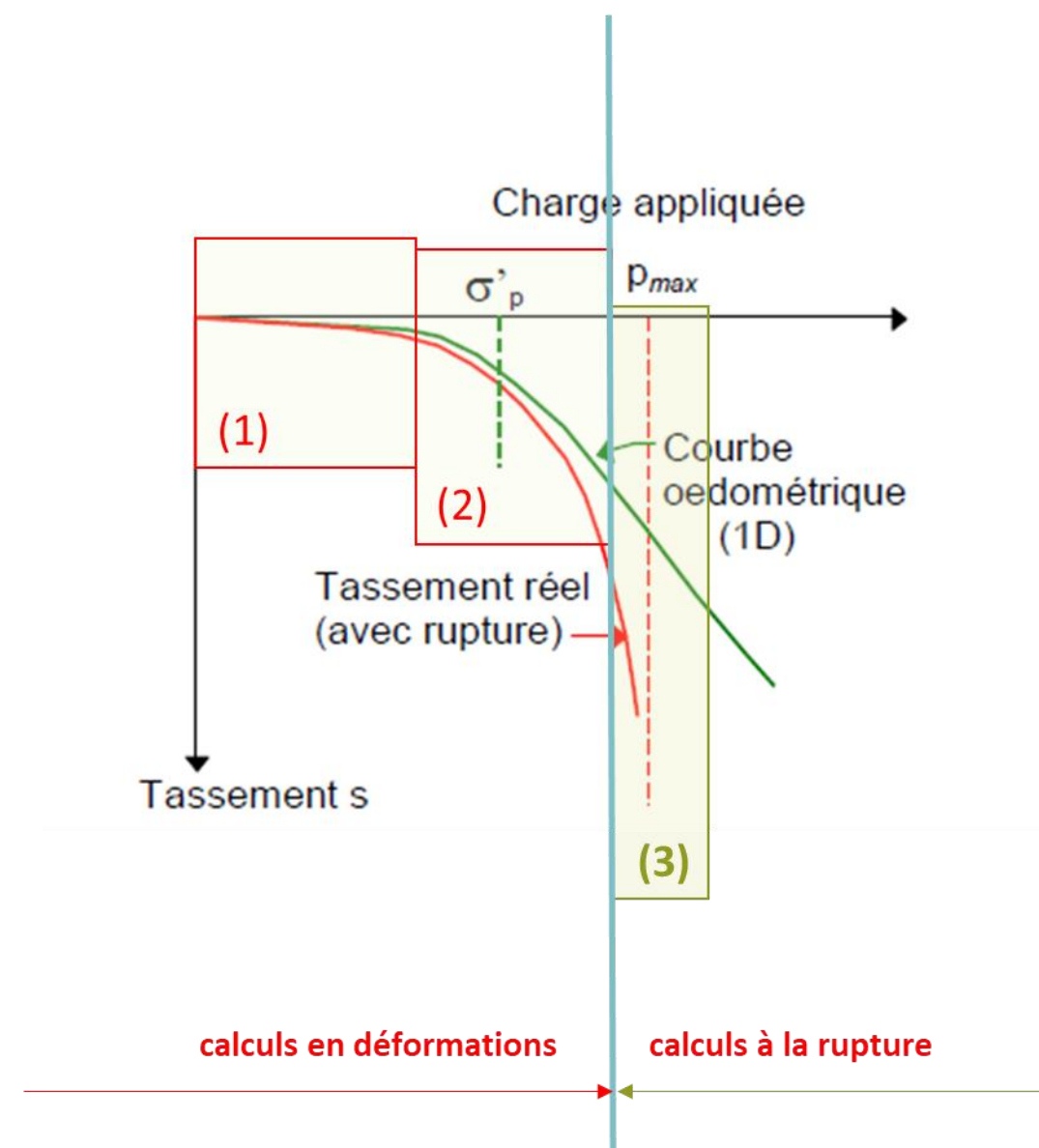


Objectifs du calcul en éléments finis :

- estimation des tassements,
- estimation des tassements différentiels,
- évolution dans le temps des tassements,
- estimation des déplacements horizontaux, rotations, ...
- capacité portante,
- comportement sous charges cycliques, ...
- ...

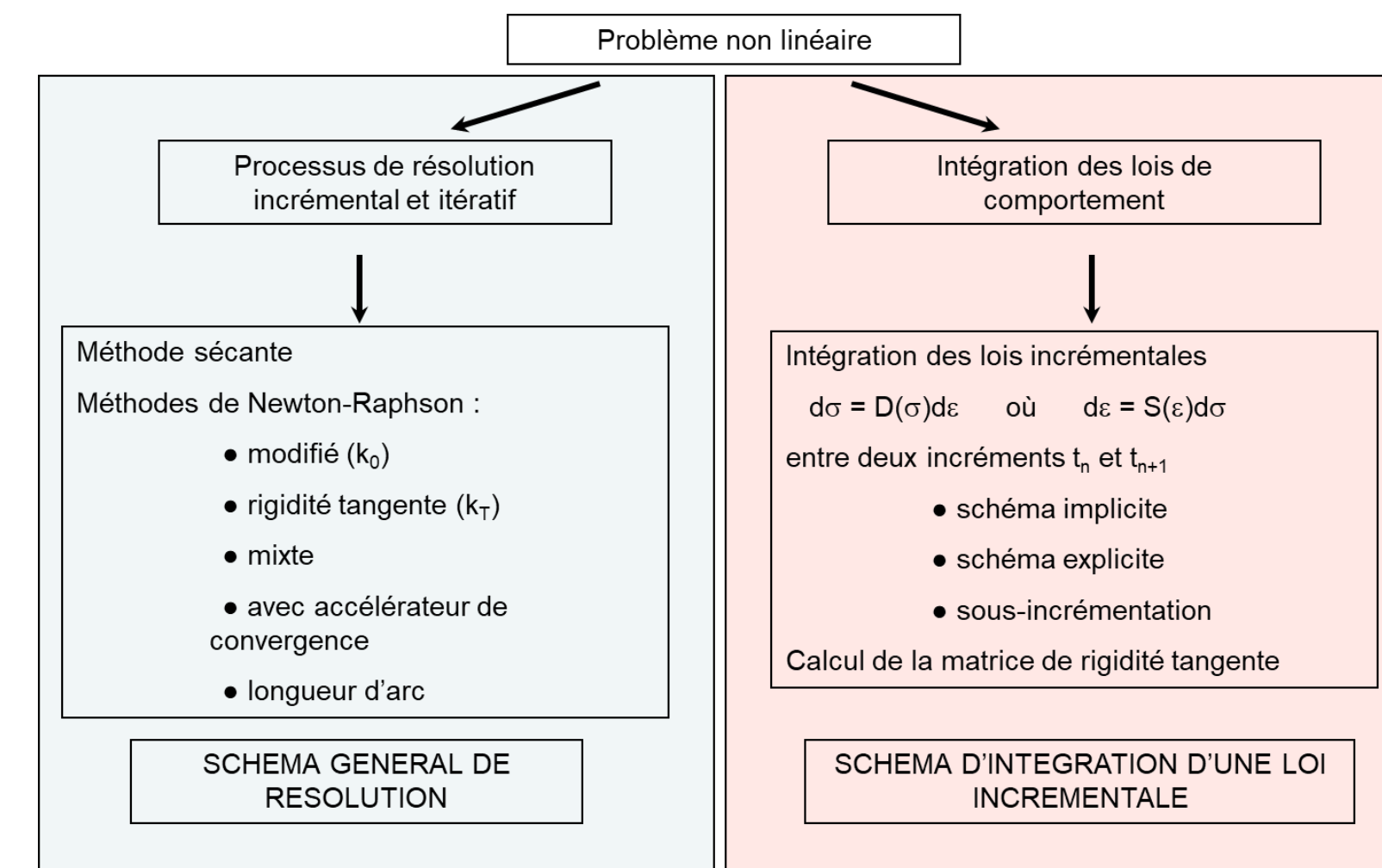
Paramètres de calcul :

- paramètres de déformation/résistance des sols,
- paramètres de déformation/résistance de bétons,
- paramètres d'interaction (frottement aux interfaces),
- ...



Paramètres numériques :

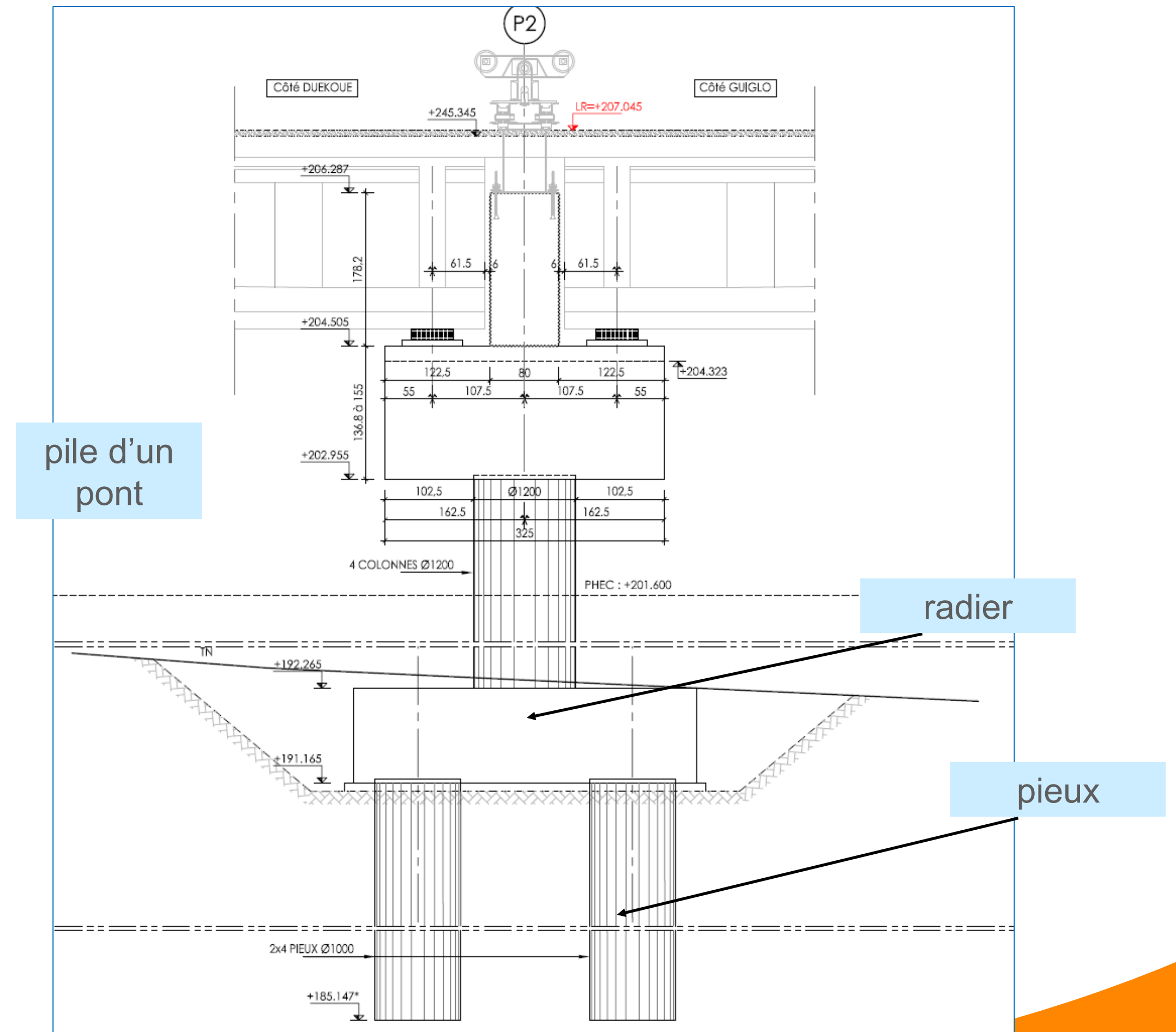
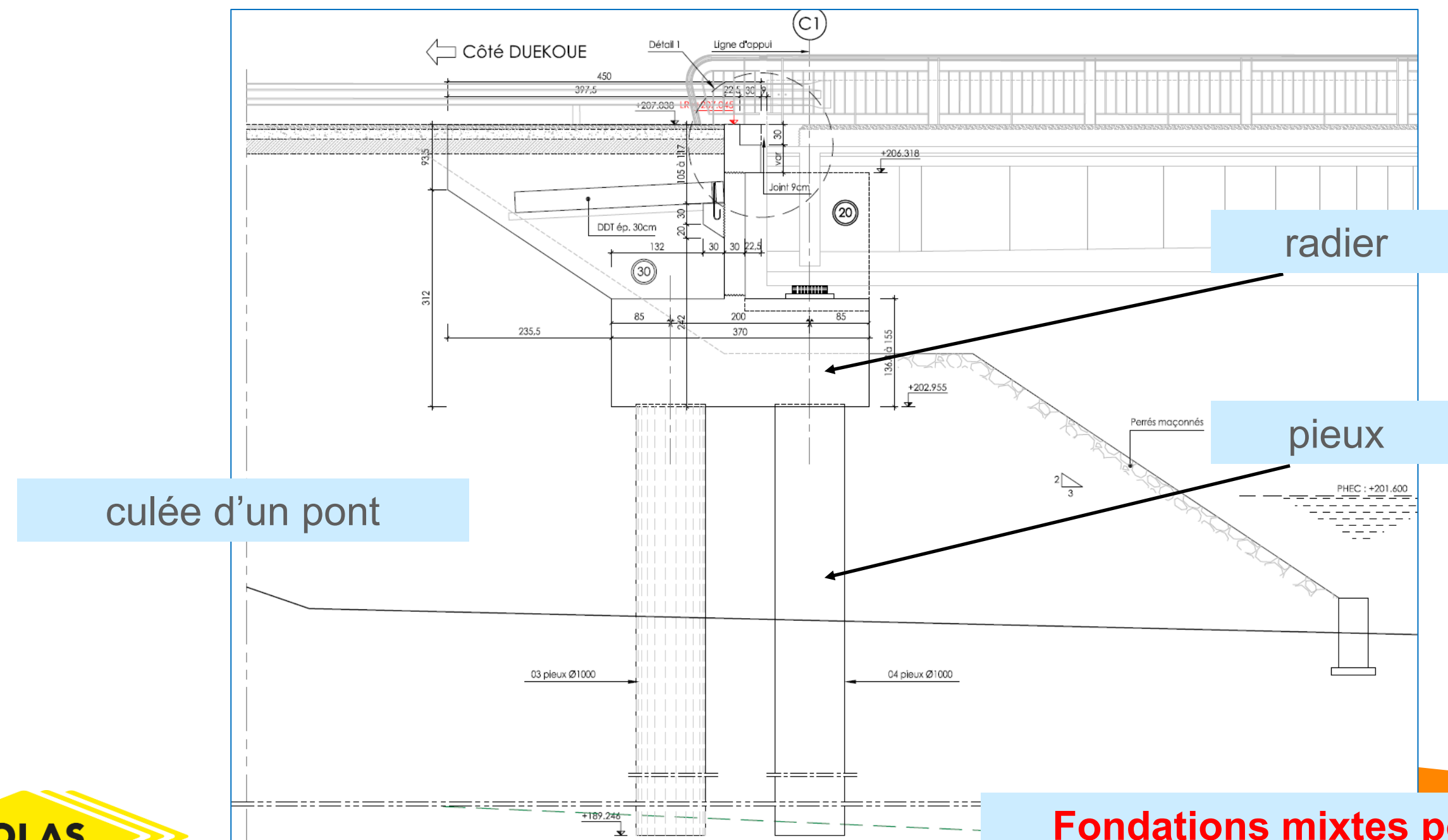
- convergence en résolution globale,
- convergence en résolution locale,
- ...



Modélisation en éléments finis – stratégies de calcul

Construction du modèle en EF

- géométrie et maillage : la géométrie doit être 3D,
- conditions aux limites :
 - du modèle géométrique (en respectant la ZIG),
 - au niveau des interfaces éventuellement,
- niveaux d'eau,
- ...



Fondations mixtes pour les ponts : souvent, de l'optimisation.
(projets internes COLAS)

Modélisation en éléments finis – stratégies de calcul

Etat des contraintes initiales

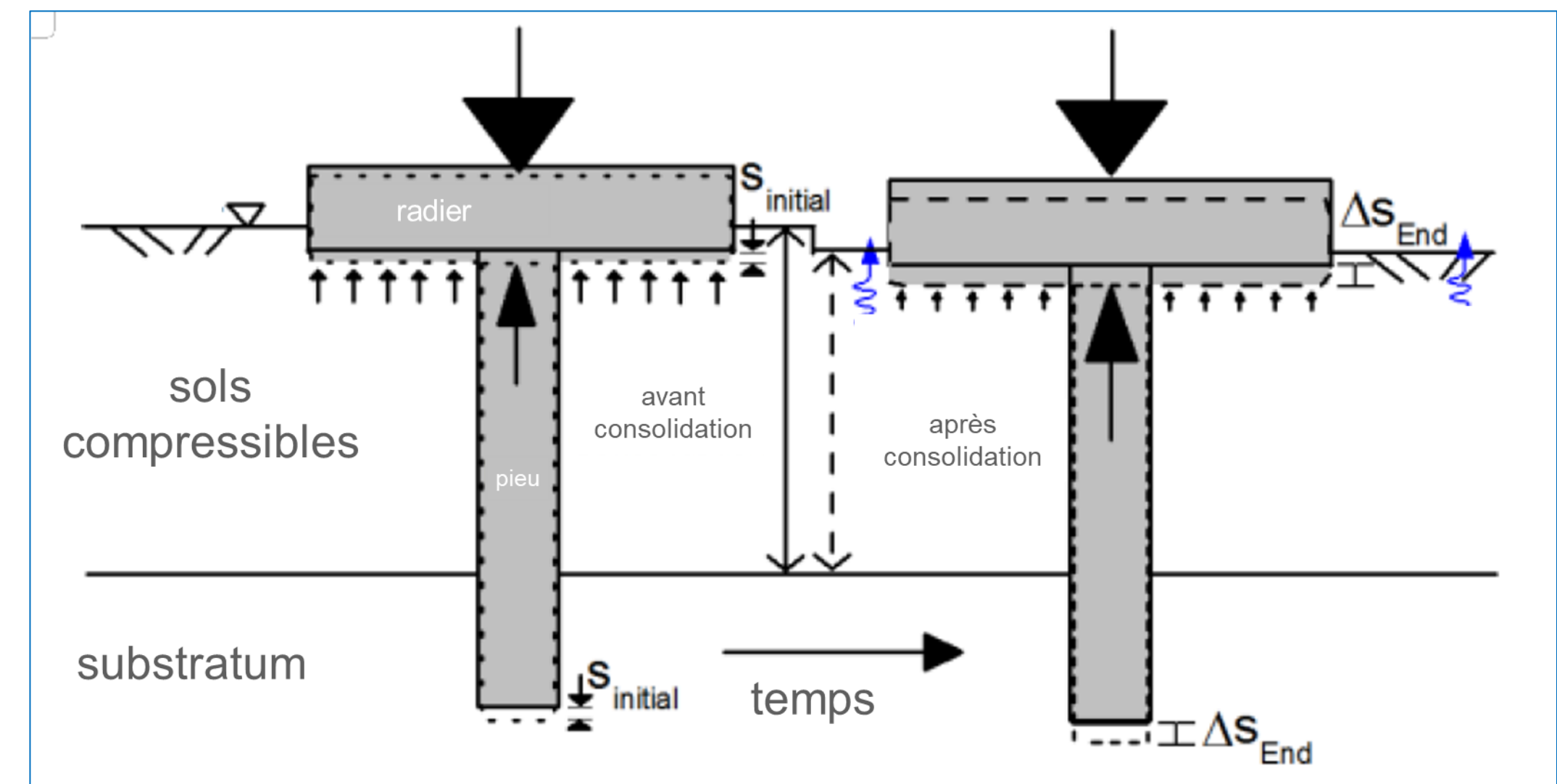
- initialisation des états de contraintes pour les calculs en éléments finis,
- estimation de k_0 .

Phasage de construction

- malheureusement : assez peu décrit/pris en compte dans le calcul des fondations mixtes,
- on calcul directement la fondation mixte radier-pieux.

Couplage hydro-mécanique, consolidation, fluage des sols

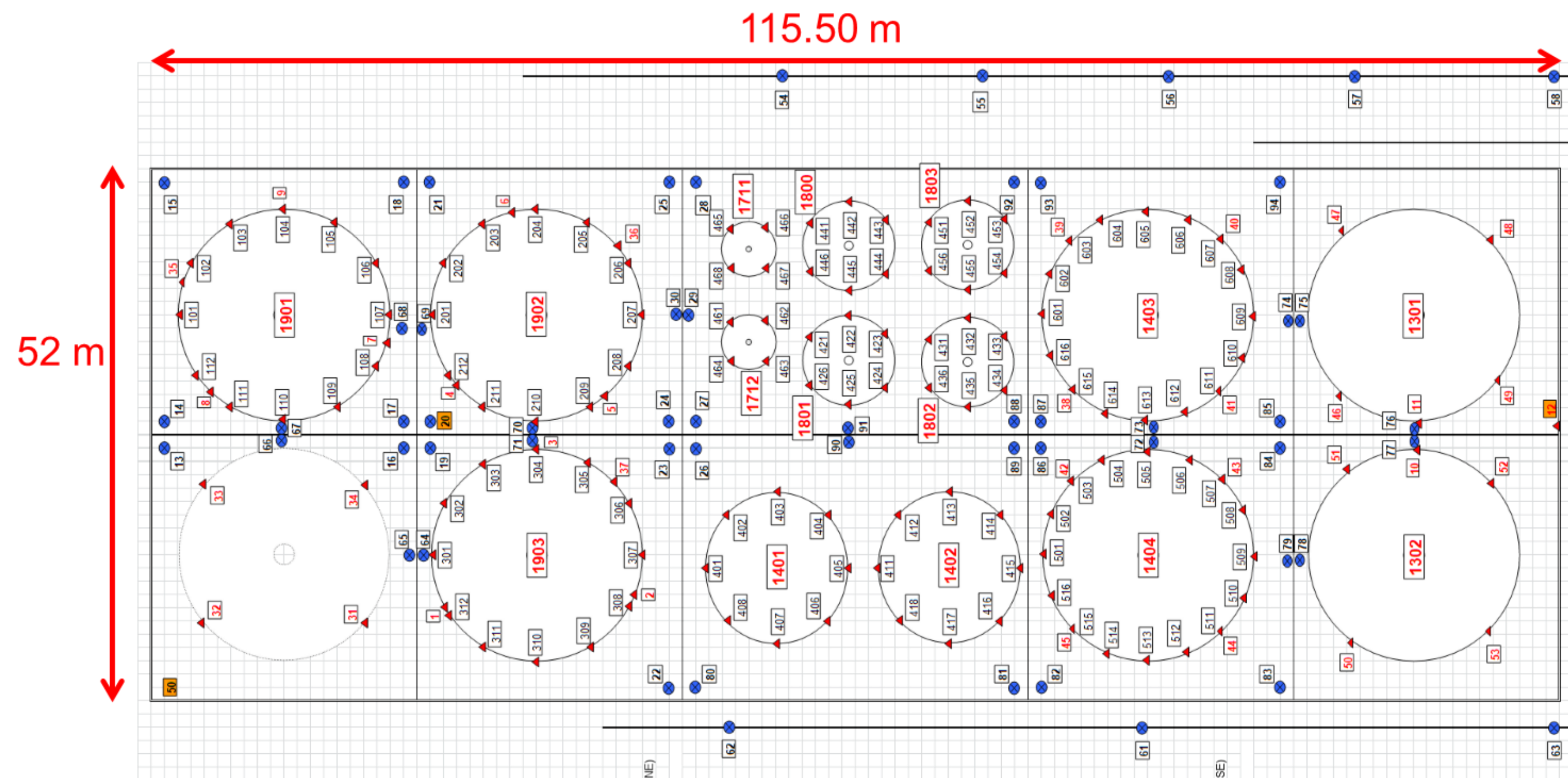
- en fonction de condition de site, des conditions du projet,
- le temps intervient dans les calculs,
- prise en compte des surpressions interstitielles,
- prise en compte de déformations de consolidation secondaire/fluage.
 - cas particulier du fluage :



Watcharasawe et al. (2017) : 3-D NUMERICAL ANALYSIS OF CONSOLIDATION EFFECT ON PILED RAFT FOUNDATION IN BANGKOK SUBSOIL CONDITION – IJ of GEOMATE.

Exemple d'un ouvrage construit sur sols compressibles

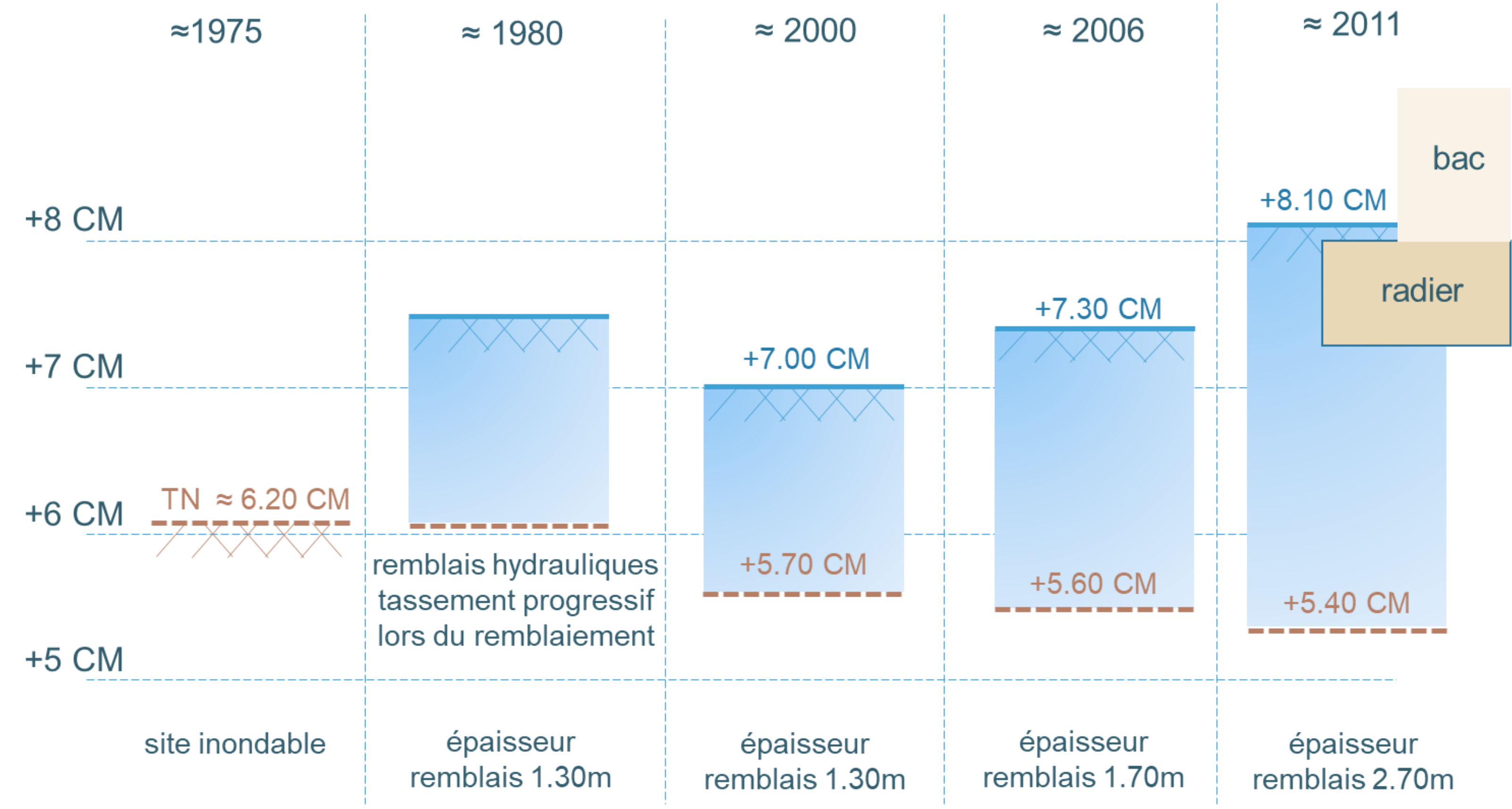
- Il s'agit d'une unité de production industrielle - construction en 2007.
- Cette unité comprend une zone de stockage constituée d'un ensemble de cuves comprises dans une enceinte de rétention d'une emprise au sol de 115.5x52m.
- L'enceinte de rétention et les cuves reposent sur des dalles en béton elles-mêmes posées sur des pieux en béton d'une fiche de 24 à 29m environ (pieux Atlas ou pieux vissés moulés, etc.) : diamètres entre 46/67cm et 56/81cm, pour la plupart.
- A la mise en charge des cuves (2007), un tassement immédiat d'une vingtaine de millimètres a été constaté : depuis, le site, en exploitation, a été suivi notamment au niveau de la dalle de rétention et des bacs, les tassements cumulés atteignent localement plusieurs dizaines de centimètres, variables selon les zones et les ouvrages.
- Pour certains pieux, le coefficient de sécurité est plus faible que la valeur habituellement demandée, d'où la nécessité d'étudier plusieurs solutions de confortement :
 - une de solutions étudiées → fondation mixte radier-pieux



Exemple d'un ouvrage construit sur sols compressibles

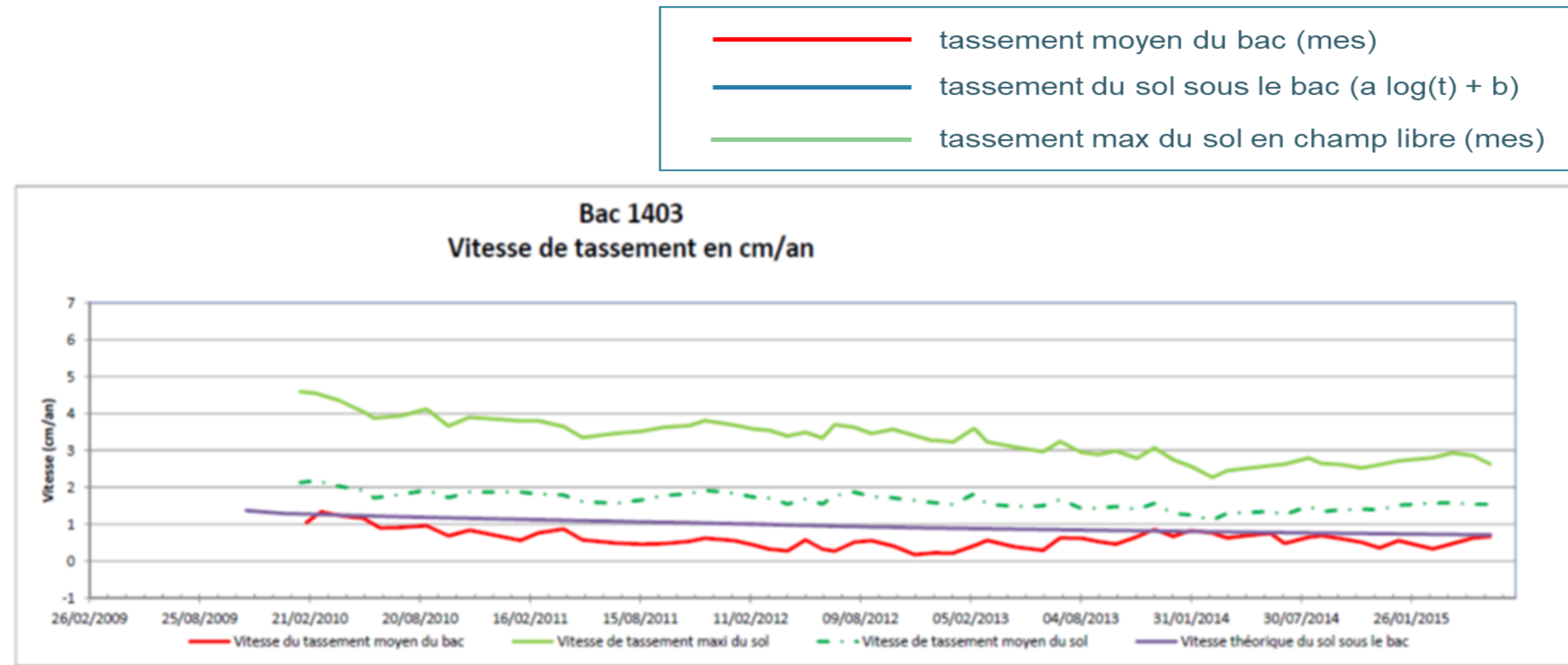
historique du site plutôt complexe :

CM = côte marine



Exemple d'un ouvrage construit sur sols compressibles

Les terrains en place tassent, avec ou sans chargement (certainement, à des variations des niveaux de nappes) :

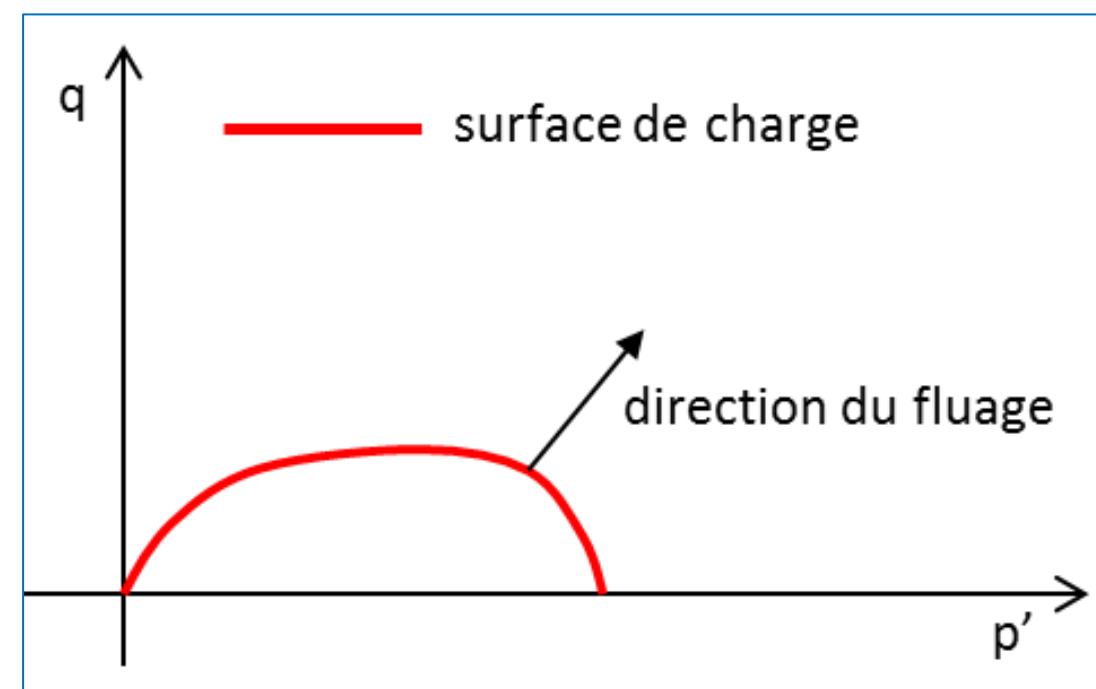


2009

2015

Exemple d'un ouvrage construit sur sols compressibles

Cas particulier du fluage



Si G est le potentiel définissant la direction de fluage et λ , un scalaire réel appelé multiplicateur de fluage, la loi d'écoulement pour le fluage est :

$$\dot{\varepsilon}^c = \lambda \frac{\partial G}{\partial \sigma} = \lambda G_\sigma$$

La loi étant associée et la surface de limite de fluage définie par la fonction F , le vecteur unitaire définissant la direction de déformation de fluage est :

$$G_\sigma = \frac{\frac{\partial F}{\partial \sigma}}{\left\| \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\|}$$

La valeur du multiplicateur λ intervenant dans la loi d'accélération du fluage est donnée par la relation suivante :

$$\lambda = \dot{\varepsilon}^c \frac{t_c^\alpha}{t}, \quad t \geq t_c$$

Le terme $\dot{\varepsilon}^c$ désigne la vitesse de fluage initiale et prise égale au coefficient de compression secondaire :

$$C_{\alpha\varepsilon} = \frac{C_{\alpha e}}{1+e_0}$$

au temps de déclenchement du fluage $t = t_d$. Les deux paramètres du modèle sont donc $C_{\alpha e}$ et α . A chaque pas de temps, nous considérons que la déformation de fluage et sa vitesse sont liées par le pas de temps :

$$\varepsilon^c = \Delta t \dot{\varepsilon}^c$$

Exemple d'un ouvrage construit sur sols compressibles

Stratigraphie et paramètres des sols en place :

Couches	Modèle élastoplastique	Épaisseur [m]		élastoplasticité / Mohr Coulomb					Consolidation primaire			CamClay			
		Min	Max	γ [kN/m ³]	c' [kPa]	ϕ' [°]	E [kPa]	ν [-]	e_0 [-]	C_c [-]	C_s [-]	λ [-]	k [-]	M [-]	P_{c0} [kPa]
Remblais	Mohr Coulomb	1.5	4.5	18.5	1	32	10000	0.33	-	-	-	-	-	-	-
Alluvions fluviomarines1	CamClay	1.4	5.4	15.0	-	15	1500		2.700	0.55	0.15	0.239	0.065	0.6	45
Alluvions fluviomarines 2	CamClay	1.4	4.0	15.0	-	15	1500		2.160	0.56	0.15	0.243	0.065	0.6	60
Alluvions sableuses	Mohr Coulomb	1.6	4.3	18.0	1	28	20000		-	-	-	-	-	-	-
Alluvions marines1	CamClay	4.8	8.0	16.0	-	25	5600		1.545	0.60	0.15	0.261	0.065	1.0	115
Alluvions marines2	CamClay	4.5	8.8	16.0	-	25	5600		1.545	0.52	0.15	0.226	0.065	1.0	150
Altérites de gneiss	Mohr Coulomb	0.7	7.3	20.0	50	0	24000		-	-	-	-	-	-	-
Gneiss décomposé	Mohr Coulomb	2.0	8.9	22.0	20	35	50000		-	-	-	-	-	-	-
Gneiss sain	Mohr Coulomb	64.9	69.0	22.0	100	35	1800000		-	-	-	-	-	-	-

- γ poids volumique
- c' cohésion effective
- ϕ' angle de frottement interne
- e_0 indice des vides initial
- C_c indice de compressibilité
- C_s indice de gonflement
- λ indice de compressibilité Cam Clay
 $\lambda = C_c / \ln(10)$
- k indice de recompression Cam Clay
 $k = C_s / \ln(10)$
- M pente de la droite de l'état critique
 $M = 6 \sin \phi' / (3 - \sin \phi')$
- p_{c0} contrainte de préconsolidation

		Coefficients de Perm éabilité			
		$k_x = k_y$		k_z	
		m/jour	m/s	m/jour	m/s
Rem blais		8.64E-01	1.0E-05	8.64E-01	1.0E-05
Alluvions fluviomarines		1.04E-02	1.2E-07	1.04E-03	1.2E-08
Alluvions sableuses		8.64E-01	1.0E-05	8.64E-01	1.0E-05
Alluvions marines		5.50E-02	6.4E-07	1.12E-02	1.3E-07
Altérites de gneiss		8.64E-01	1.0E-05	8.64E-01	1.0E-05
Gneiss decom posé		8.64E-01	1.0E-05	8.64E-01	1.0E-05

Exemple d'un ouvrage construit sur sols compressibles

La modélisation est faite en suivant les phases suivantes :

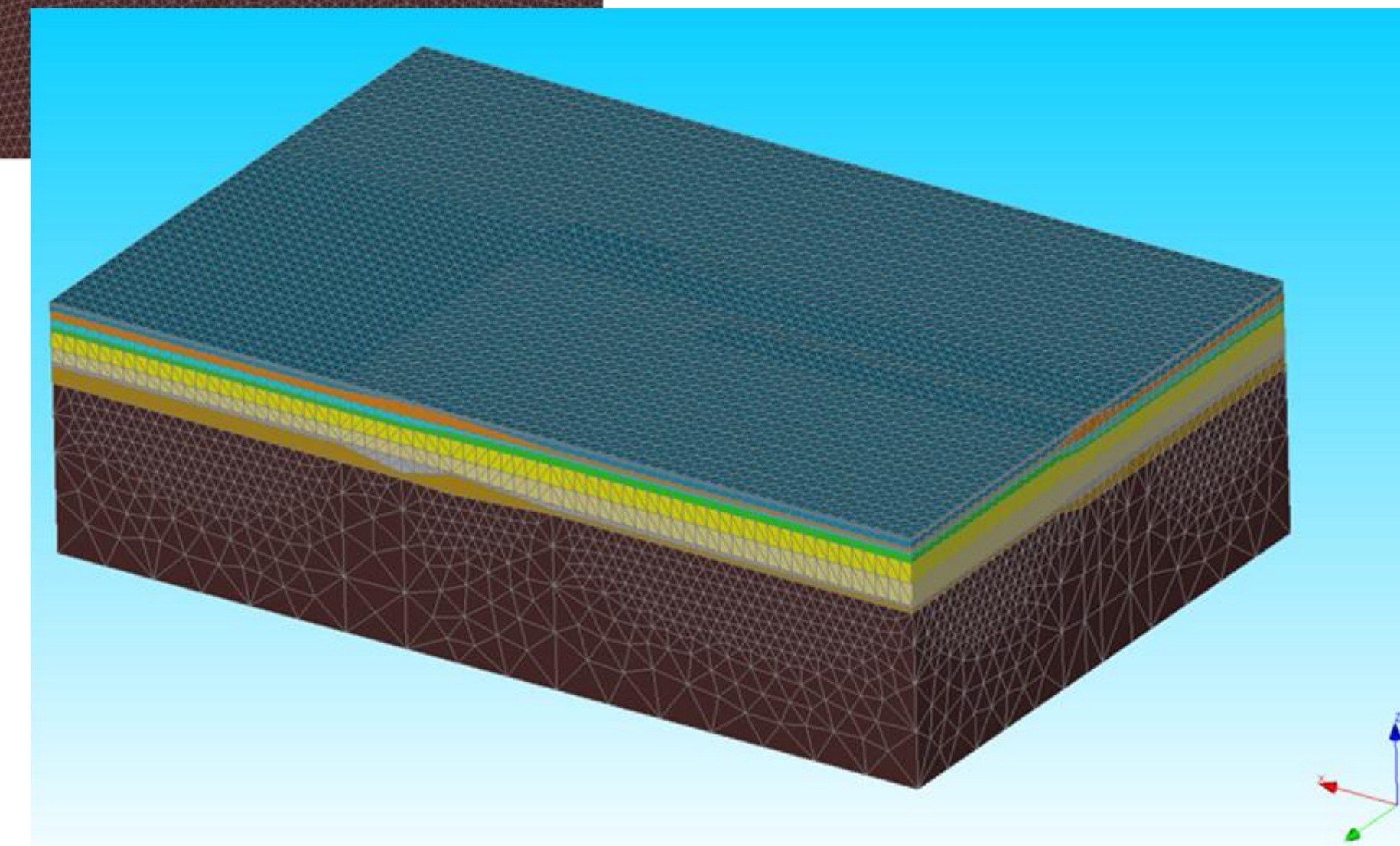
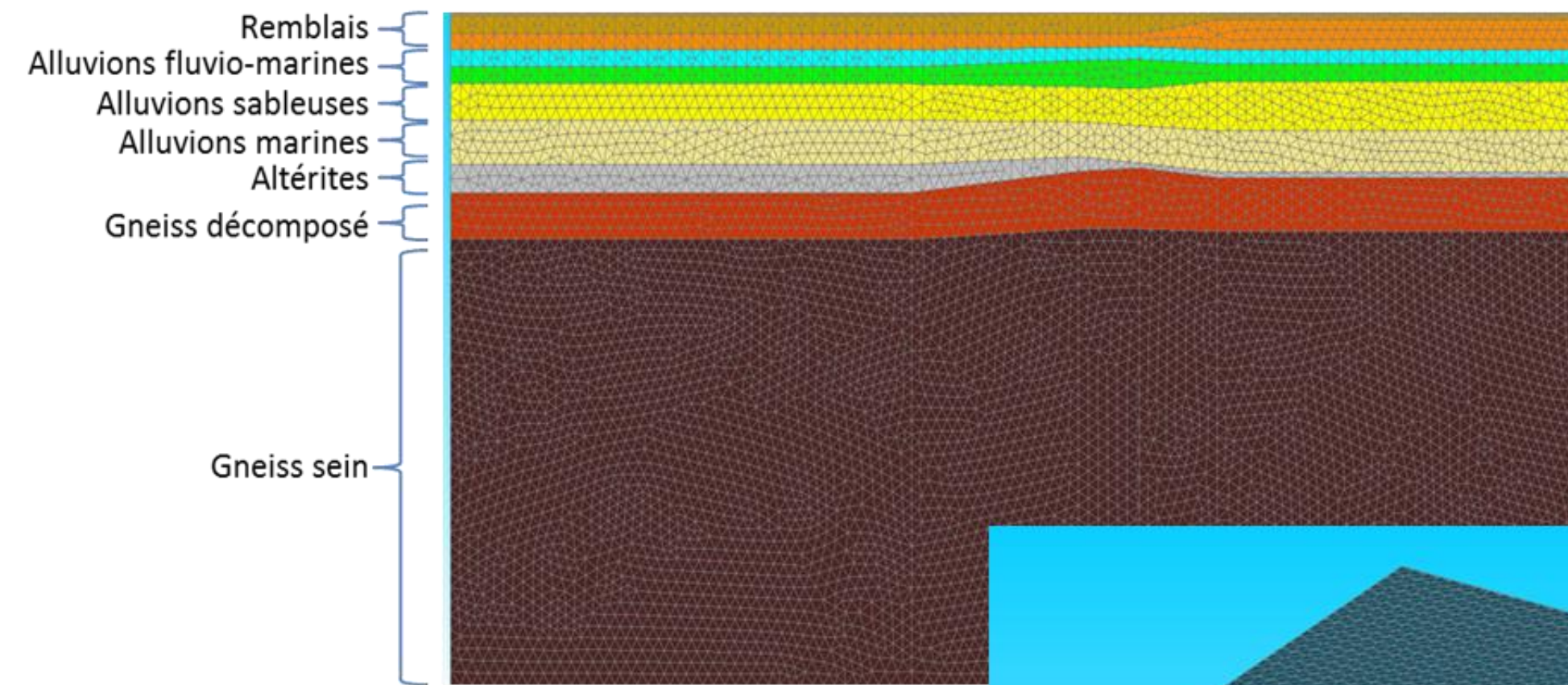
- phase 0 : initialisation des contraintes et des pressions interstitielles
- phase 1 : reprise des contraintes, apport remblai en 1975, tassement consolidation primaire
- phase 2 : reprise des contraintes, tassement consolidation secondaire
- phase 3 : reprise des contraintes, apport remblai en 2000 ; tassement consolidation primaire
- phase 4 : reprise des contraintes, tassement consolidation secondaire (t_c pris en compte en 2002)
- phase 5 : reprise des contraintes, apport du remblai en 2006, tassement consolidation primaire
- phase 6 : reprise des contraintes, calcul du tassement secondaire du au fluage.

Phase	Description	Durée		Debut [s]	Pas de temps [s]	Nbre pas de temps	Durée cumulée	
		[mois]	[s]				[s]	[années]
0	Initialisation contraintes et pressions interstitielles	0	3600	0	3600	1	3600	0.00
1	Consolidation jan 1975 - déc 1977	36	9E+07	3600	7.78E+06	12	9.3E+07	3.00
2	Fluage jan 1978 - déc 2000	276	7E+08	9.3E+07	7.78E+06	92	8.1E+08	26.00
3	Consolidation jan 2001 - déc 2002	24	6E+07	8.1E+08	5.18E+06	12	8.7E+08	28.00
4	Fluage jan 2003 - août 2006	44	1E+08	8.7E+08	5.18E+06	22	9.8E+08	31.67
5	Fluage sept 2006 - déc 2030	112	3E+08	9.8E+08	5.18E+06	56	1.3E+09	41.00
6	Fluage jan 2016 - déc 2030	180	5E+08	1.3E+09	7.78E+06	60	1.7E+09	56.00

Exemple d'un ouvrage construit sur sols compressibles

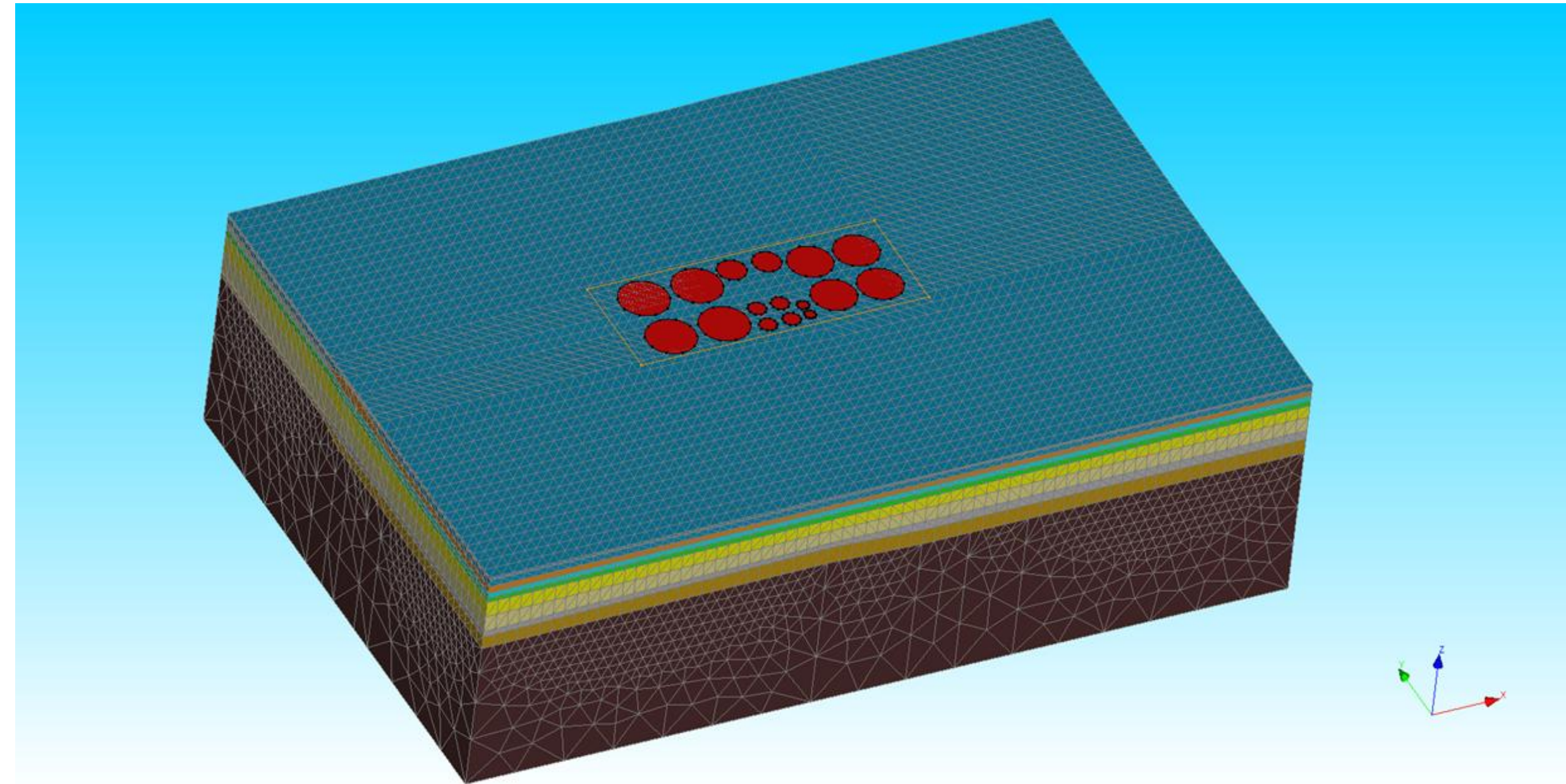
L'étude numérique par la méthode des éléments finis (CESAR-LCPC) a été réalisée de la manière suivante :

- étape 1 : modélisation du comportement des sols en consolidation avec prise en compte du fluage, en champ libre,
- étape 2 : modélisation du comportement d'un seul pieu :
 - avec ou sans interface,
 - comparaisons aux résultats d'essais de chargement de pieux disponibles,
- étape 3 : modélisation d'un seul pieu, avec un radier en tête et étude de la répartition de la charge entre le pieu et le radier :
 - modèle « unitaire »,
- étape 4 : modélisation des fondations des bacs, en géométrie tridimensionnelle et interactions.



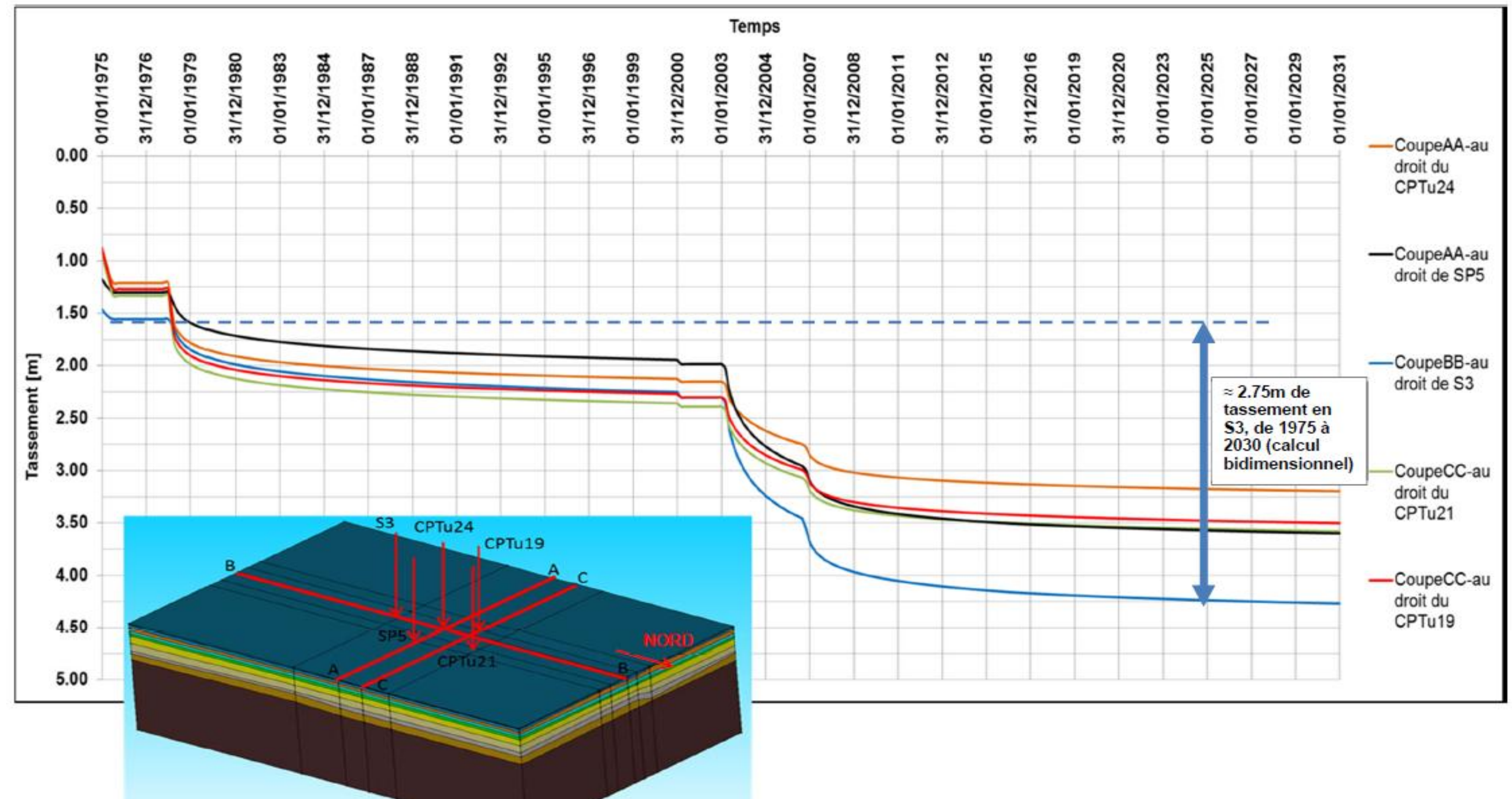
Exemple d'un ouvrage construit sur sols compressibles

Modèle EF 3D



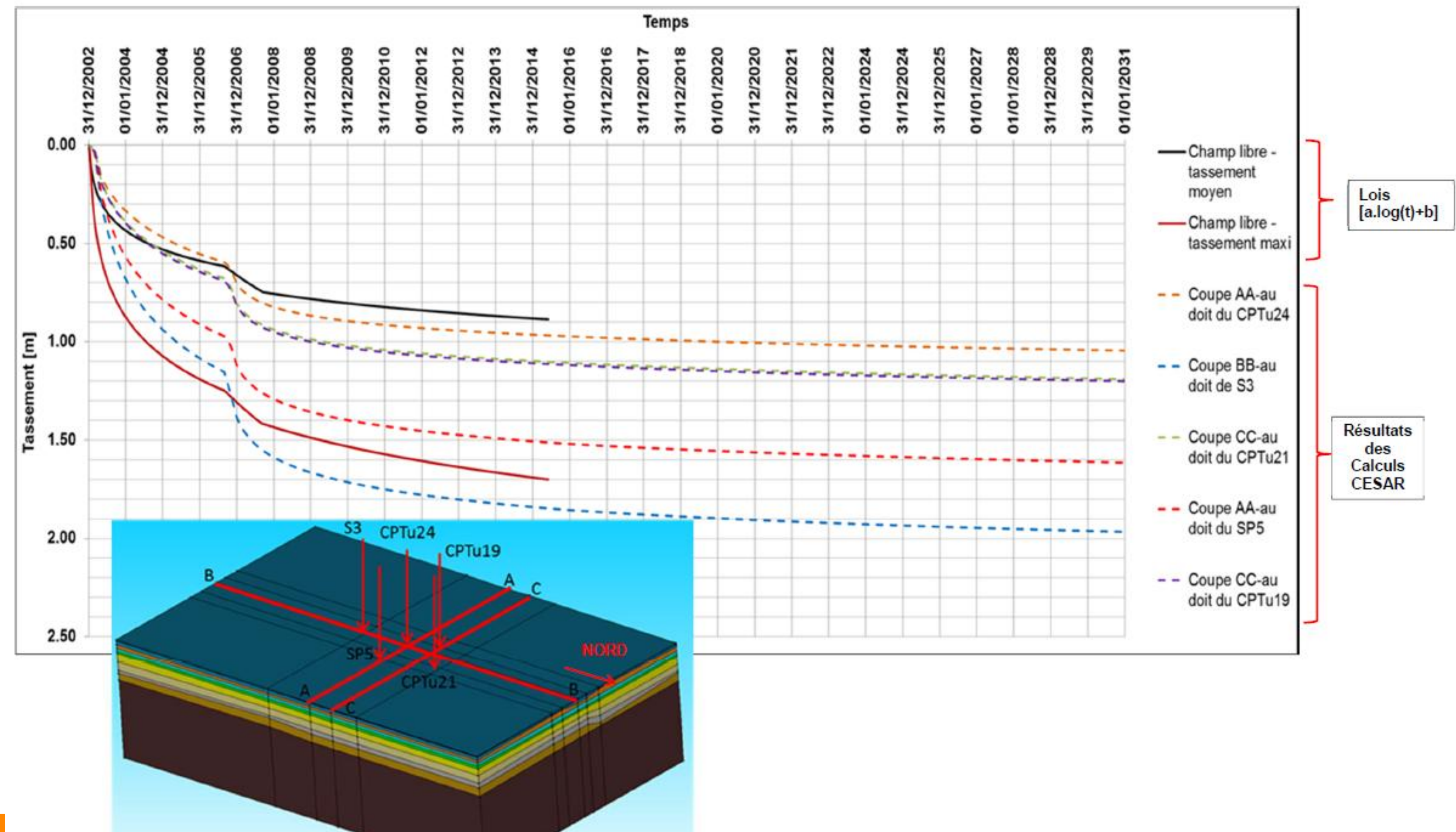
Exemple d'un ouvrage construit sur sols compressibles

Calculs en éléments finis
CESAR-LCPC en champ libre



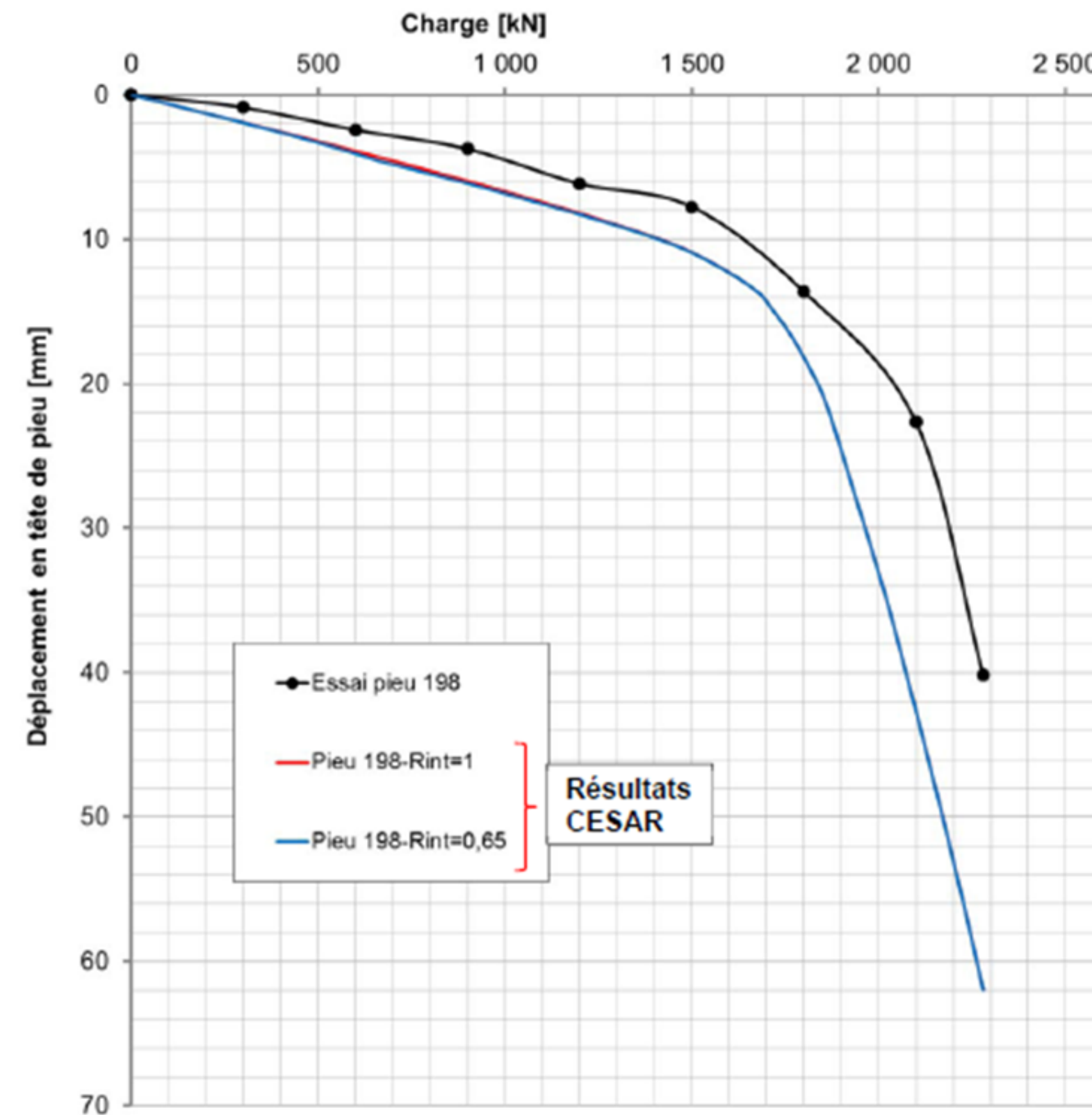
Exemple d'un ouvrage construit sur sols compressibles

Calculs en éléments finis
CESAR-LCPC en champ libre

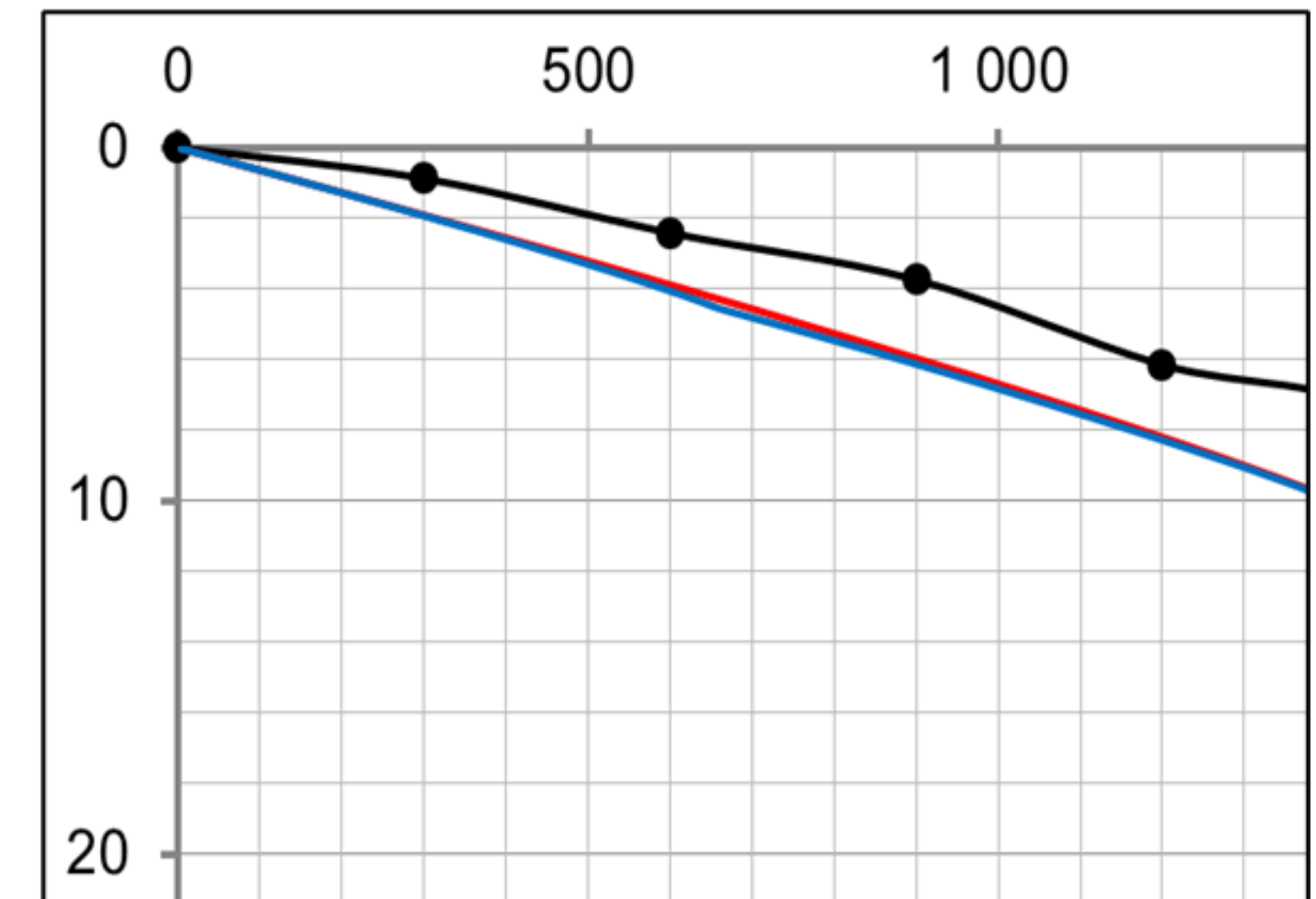


Exemple d'un ouvrage construit sur sols compressibles

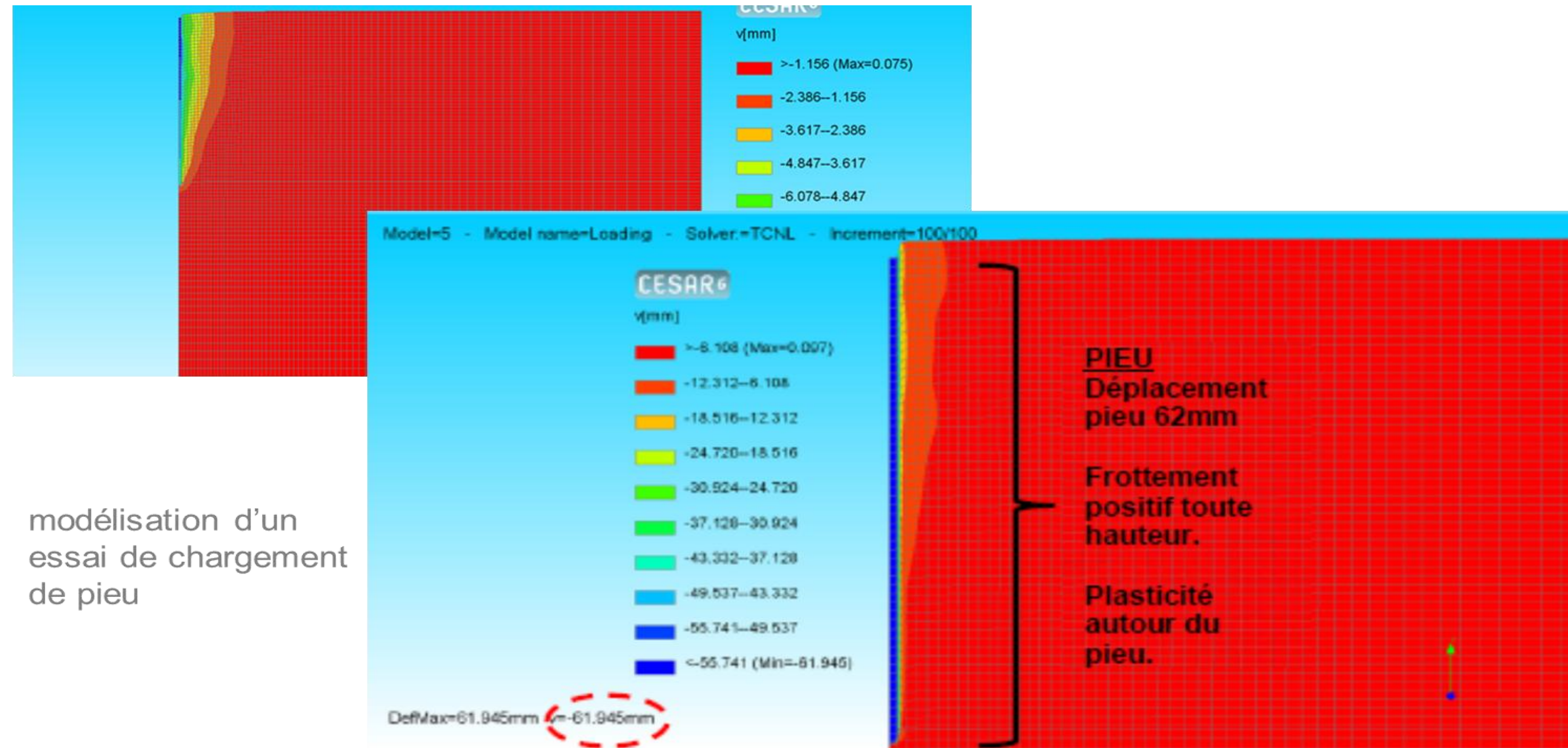
Calculs en éléments finis
CESAR-LCPC essai de
chargement d'un pieu



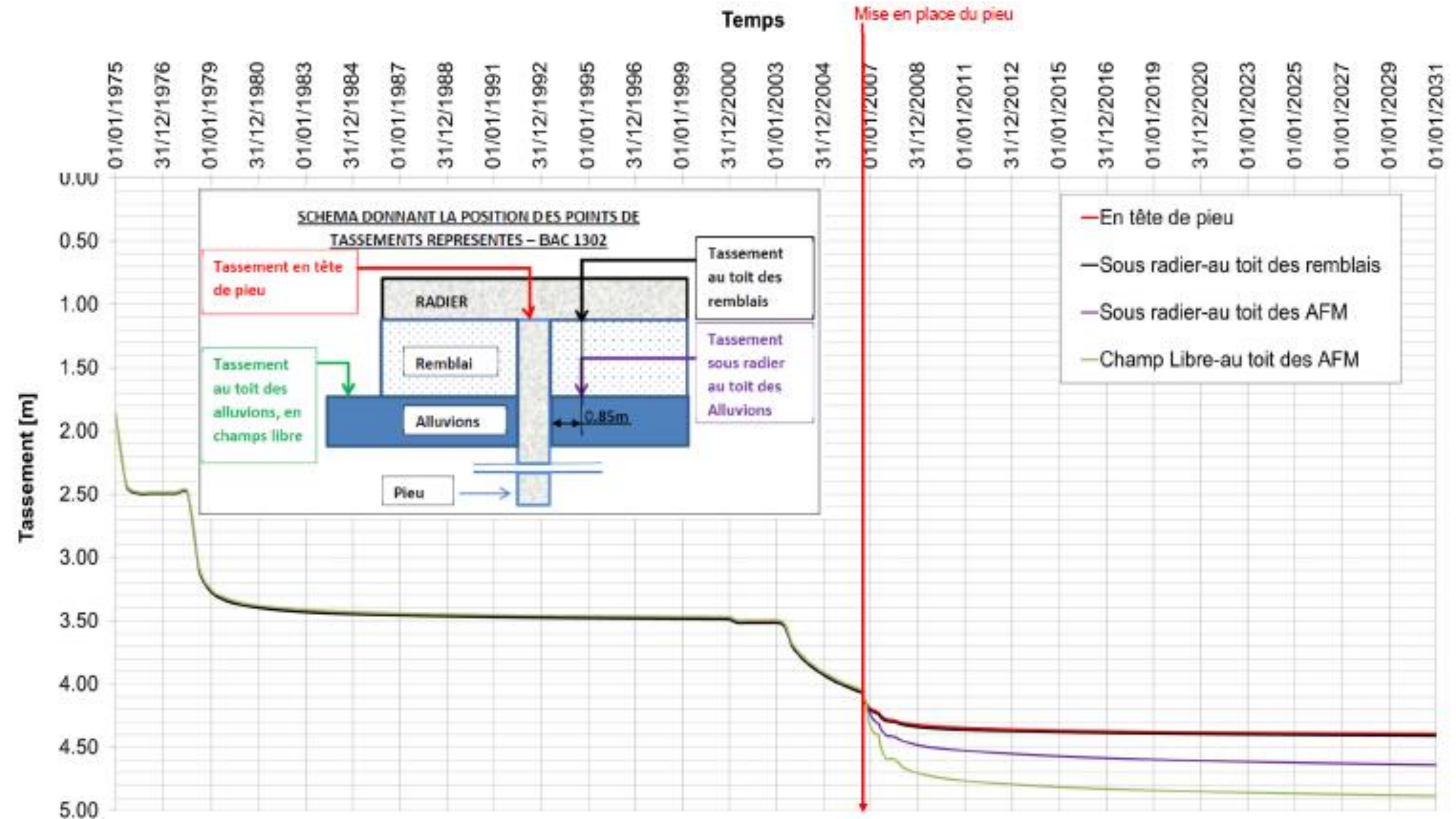
Essai de chargement des pieux et
modélisation en éléments finis



Exemple d'un ouvrage construit sur sols compressibles

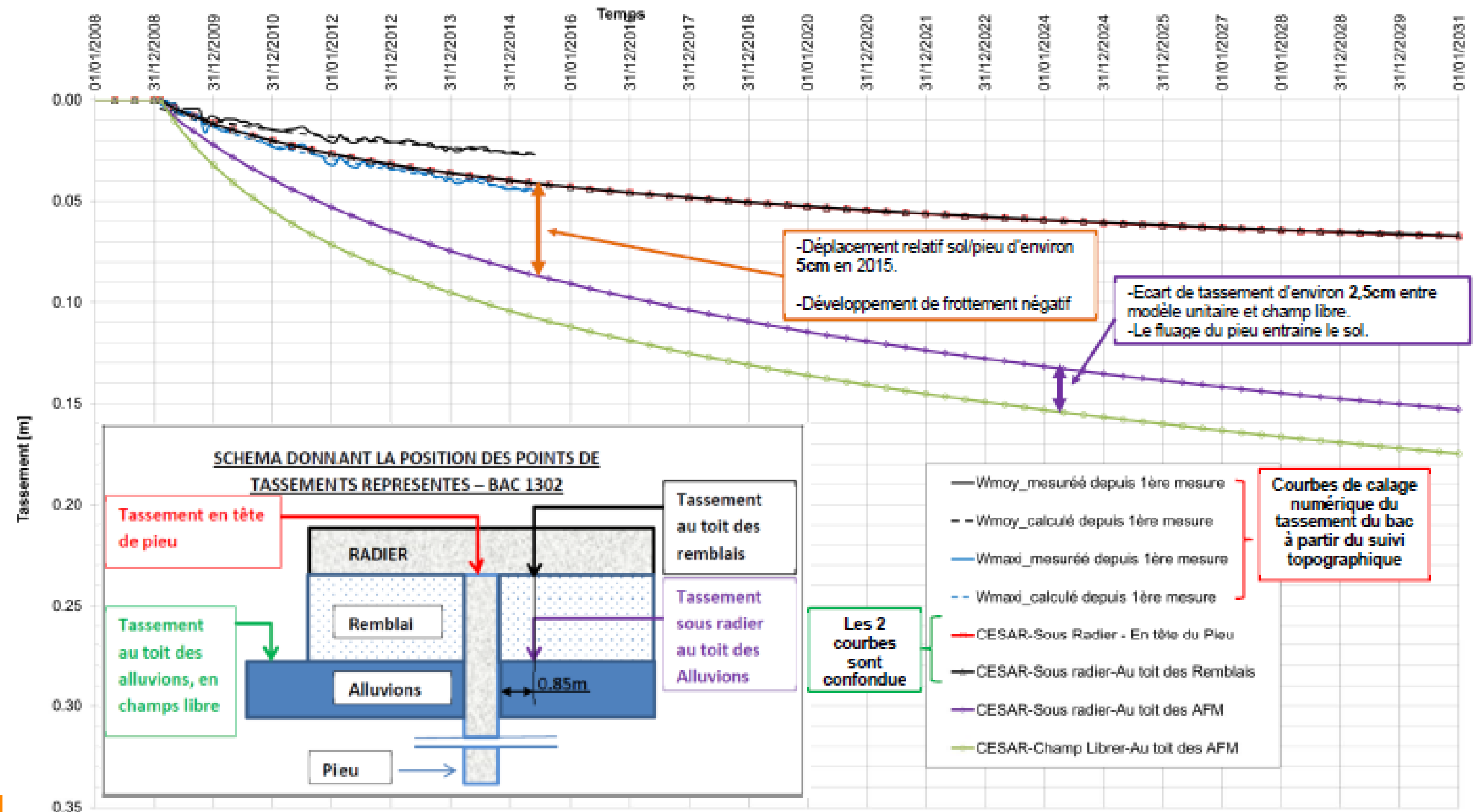


Exemple d'un ouvrage construit sur sols compressibles



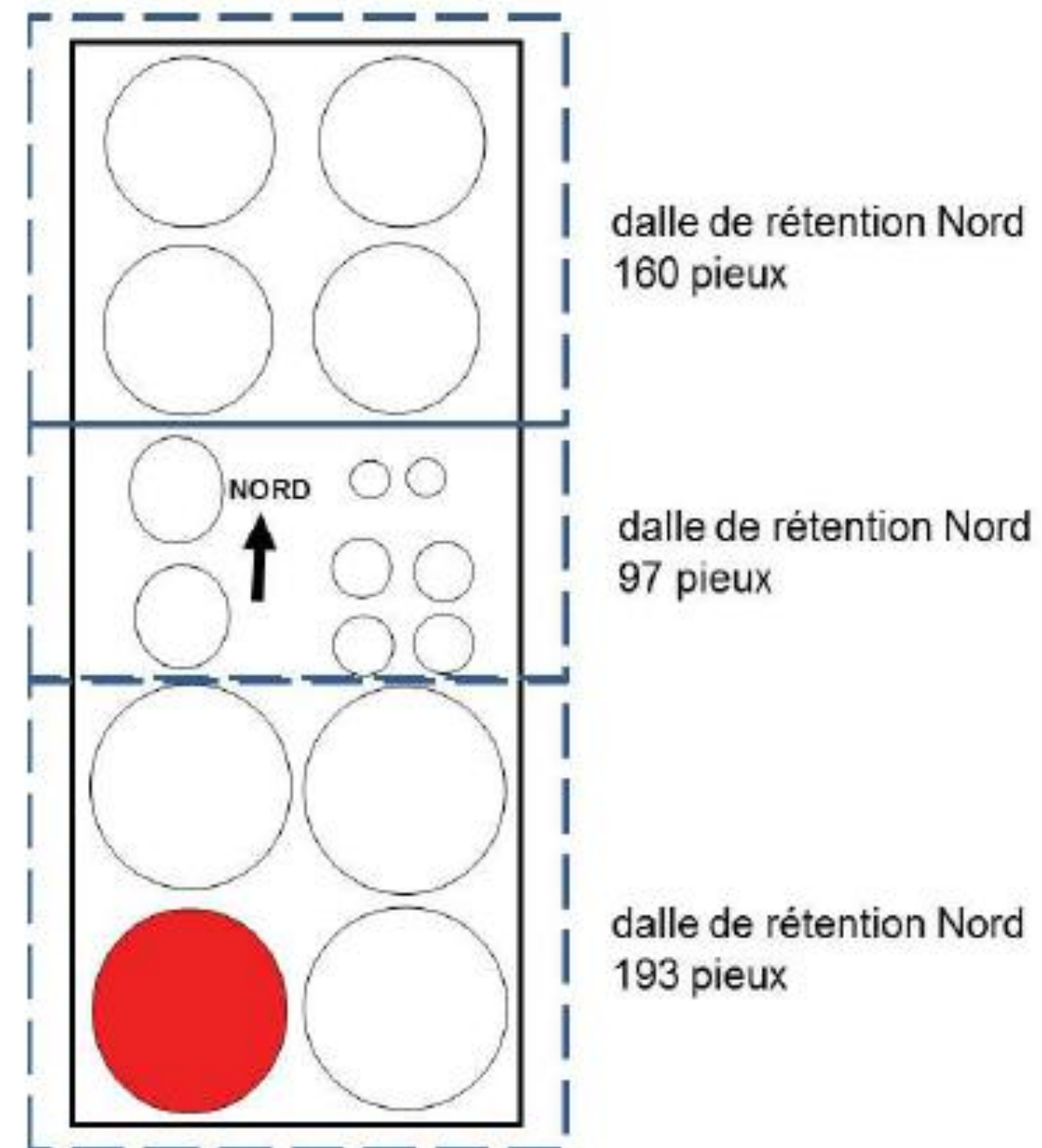
Exemple d'un ouvrage construit sur sols compressibles

Calculs en éléments
finis CESAR-LCPC
modèle unitaire

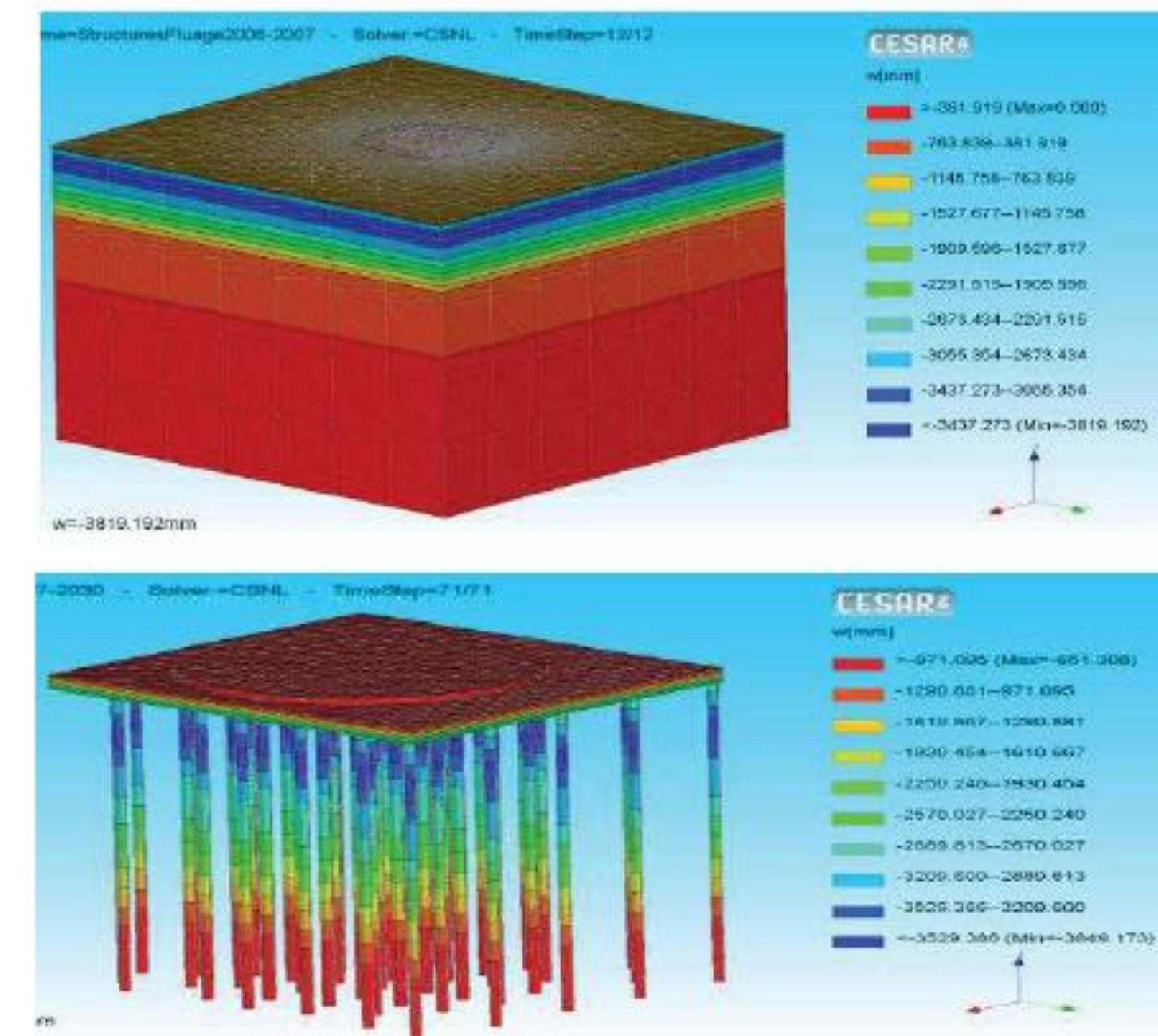


Exemple d'un ouvrage construit sur sols compressibles

Calculs en éléments finis
CESAR-LCPC : modèle 3D



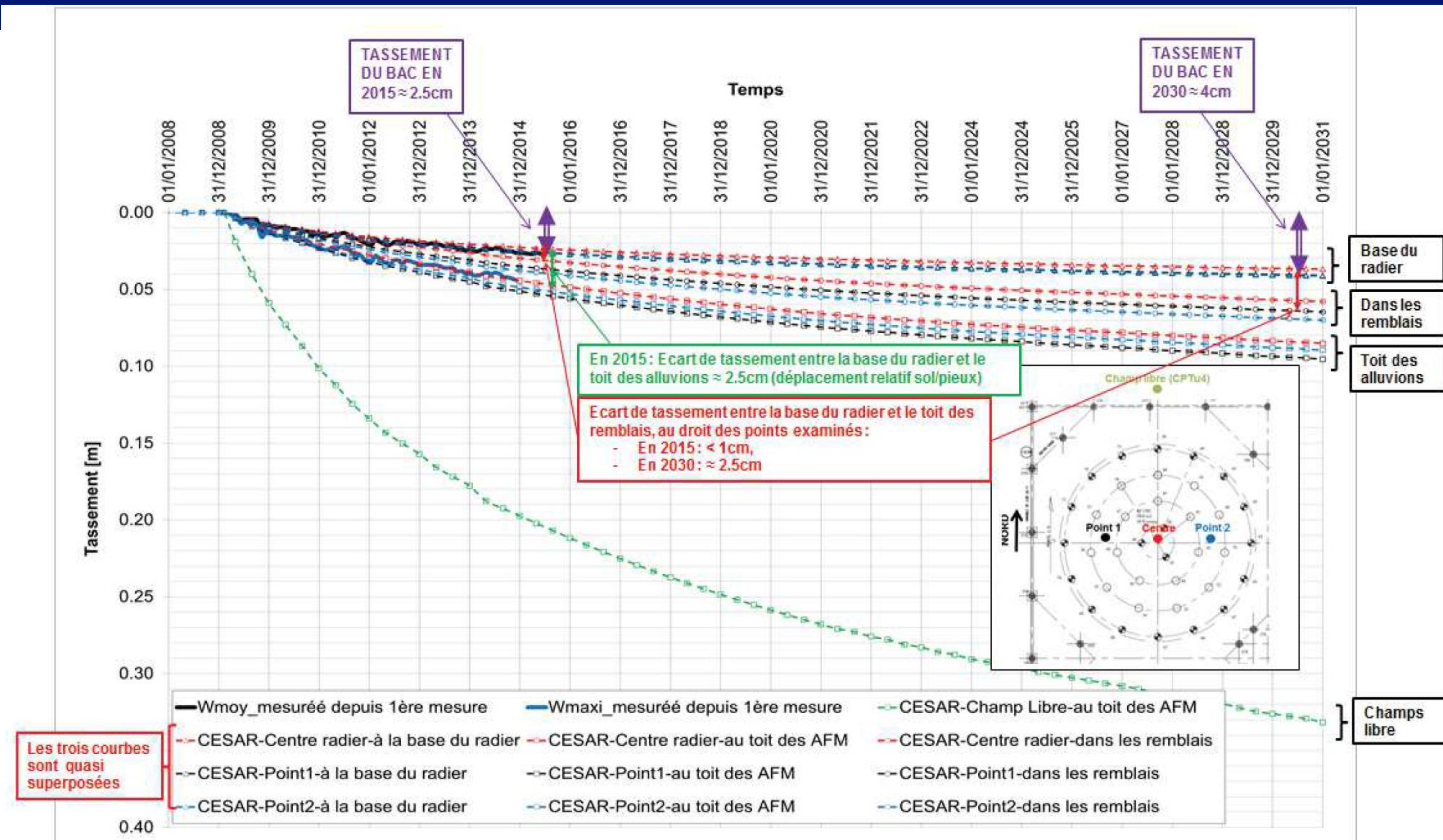
vue en plan : schéma



modèle en éléments finis du bac 13.20

Exemple d'un ouvrage construit sur sols compressibles

- à la base du radier : le tassement du radier est identique que l'on se place au centre du radier ou à mi rayon (environ 2,5 cm en 2015 et 4 cm en 2030) ;
- au toit des alluvions : le comportement du sol diffère peu suivant les points d'observations et donc de la densité de pieux modélisés autour de ceux-ci (écart de tassement du sol d'environ 1 cm au plus, d'un point à l'autre et écart de tassement entre la base du radier et le toit des remblais de moins de 1 cm en 2015 et de l'ordre de 2.5 cm en 2030) ;
- cela pourrait donc avoir de répercussions sur le comportement de la fondation mixte au cours du temps (perte du contact entre le radier et le sol).



Conclusions

1. Fondation mixte radier-pieux : un problème d'interaction

2. La méthode des éléments finis se prête à la modélisation du comportement des fondations mixtes, mais différents points d'attention et de complexité de comportement mécanique apparaissent :

- état des contraintes initiales,
- comportement des sols et leur paramètres mécaniques,
- choix de lois de comportement,
- portance globale / celle du radier / celle des pieux,
- frottement mobilisé, positif, négatif, contrainte en pointe, pression de contact radier-sol
- sollicitations des éléments de structure,
- y a-t-il consolidation / fluage ?

3. Quelle résolution numérique locale/globale adopter et comment interpréter en termes de résultats ?

4. Les résultats devront être analysés sur la base des notions « mécaniques » pertinentes :

- contraintes, déformations, efforts dans les pieux et radier,
- en passant par la cohérence du modèle de comportement utilisé.

5. La modélisation par éléments finis d'une fondation mixte :

- un cas typique de modélisation en partant du **plus « simple »** (un pieu, un pieu avec radier, etc.) au **plus « complexe »** (géométrie globale, modèle de comportement des sols complexe, etc.).

6. Les modélisations en éléments finis des comportement mécaniques complexes, comme les fondations mixtes radier-pieux, doivent être complétées par des mesures de déplacements, des pressions, etc., afin de valider la modélisation aux différentes étapes des projets.