



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,  
Canales y Puertos.*  
**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



# **Análisis de interacción suelo-estructura:**

## **Esfuerzos horizontales aplicados a pilotes en el medio marítimo**

Trabajo realizado por:

***Manuel Queijeiro Rilo***

Dirigido:

***Javier López Lara; Pablo Tassi; Gilles Lefranc***

Titulación:

**Máster Universitario en  
Ingeniería de Caminos, Canales y  
Puertos**

Santander, marzo de 2022

**TRABAJO FIN DE MASTER**

## **Agradecimientos**

En primer lugar, me gustaría dar las gracias al equipo de la Dirección Técnica de VINCI Construction Maritime et Fluvial, por acogerme e integrarme en el funcionamiento de la empresa en dos ocasiones: para realizar mi proyecto de fin de estudios y durante la segunda parte de mi año de prácticas. Gracias por esta doble confianza. Gracias por todo lo que me han enseñado, por el ambiente convivial, ... por su buen humor.

Una mención especial a Gilles Lefranc, por la oportunidad que me ofreció, y a Antoine Labonde, por apoyarme y dirigir mi proyecto, con su experiencia, paciencia y profesionalismo. Gracias también a Pablo Tassi y a Javier López Lara, por su atención como tutores académicos, pero también por sus lecciones en la Universidad.

Por último pero más importante, quiero agradecer, a mis seres más queridos, su apoyo y compañía omnipresente en esta entrada al mundo profesional.

## Resumen

La interacción entre suelo y pilotes sometidos a esfuerzos horizontales es crítica en el ámbito marítimo y fluvial. Desde el siglo pasado, las teorías francesas y los sistemas de modelización han progresado en esta materia. Las diferentes complejidades de las leyes de interacción y los modelos de cálculo permiten encontrar un equilibrio entre la exactitud de los resultados y el tiempo dedicado al cálculo.

Con el fin de optimizar el proceso de diseño, el presente proyecto tiene como objetivo el análisis cualitativo y cuantitativo de las diferencias entre los diferentes modelos, utilizando una herramienta de preprocesamiento de datos creada a tal efecto y basada en la norma NF P94 - 262 para las leyes de interacción horizontal.

Para una geometría constante, de tipo duque de Alba o muelle de pilotes, la metodología seguida consiste en la realización de varios análisis que abordan la influencia de la duración de la carga, la rigidez del suelo y la presencia de una capa de limo en parámetros de diseño como el momento flector, el desplazamiento o el cociente de empuje pasivo movilizable/movilizado.

La herramienta de preprocesamiento creada y el software SAP2000 se han empleado para realizar estos análisis en función de tres modelizaciones del suelo diferentes: resortes elastoplásticos, matrices de rigidez o empotramientos equivalentes.

Los análisis de la influencia de la rigidez del suelo y del cociente de empuje pasivo permiten predecir la profundidad de empotramiento equivalente para encontrar el mismo momento flector máximo que con un modelo elastoplástico, situado entre  $1\emptyset$ - $1,5\emptyset$ , o para el mismo desplazamiento máximo, entre  $4\emptyset$ - $4,5\emptyset$ . Una media de estos resultados es el valor  $3\emptyset$ , clásicamente recomendado, pero nunca debidamente justificado. Los análisis de la duración de la carga o del tipo de suelo (cohesivo/granular) muestran una variación de estos valores de hasta el 10% para el momento máximo o el desplazamiento nulo. Las diferencias pueden ser superiores para el desplazamiento máximo, muy condicionado por la rigidez y el cociente de empuje pasivo. La presencia de una capa de limo superficial de escasa rigidez, caso frecuente en zonas sumergidas, aumentará la profundidad de empotramiento entre  $1/3$  y  $2/3$  de su espesor. Asimismo, el estudio muestra el interés en priorizar el uso de matrices de rigidez y no empotramientos para la creación de modelos de muelles de pilotes, garantizando un error inferior al 10% en el cálculo del momento flector.

**Palabras clave:** Interacción suelo-estructura, pilote, lateral, esfuerzos horizontales, marítima.

## Abstract

The soil-pile interaction under horizontal loads is critical in the maritime and fluvial field. Over the last century, French theories and modelling tools have progressed on this matter. The different complexities of the interaction laws and calculation models allow to find the balance between the accuracy of the results and the time dedicated to the calculation.

In order to optimise the design process, the current project is focused on the qualitative and quantitative analysis of the deviations of the different models, using a data pre-processing tool developed for this purpose and based on the norm NF P94 -262 for lateral interaction laws.

For a constant geometry, such as a dolphin or pile dock, the methodology adopted consists in carrying out several analyses that deal with the influence of the loading duration, the soil stiffness and the presence of muddy silt on the design parameters such as the bending moment, the displacement or the passive earth pressure ratio.

The pre-processing tool and the SAP2000 software are used to carry out these analyses according to different modelling of the terrain: springs with elastoplastic laws, linear laws defined by a stiffness matrix or an embedment at the pile tip.

Analyses of the influence of the soil stiffness and the passive earth pressure ratio allow the prediction of the equivalent embedment depth to find the same maximum moment as the elastoplastic model, located between  $1\emptyset$ - $1.5\emptyset$ , or for the maximum displacement, between  $4\emptyset$ - $4.5\emptyset$ . An average of these results is the value  $3\emptyset$ , classically recommended but never properly justified. Analyses of loading duration or the degree of cohesion of the soil, can show a variation of these values of up to 10% for moment or zero displacement. Differences can go even further for maximum displacement, strongly conditioned by the stiffness and the passive earth pressure ratio. The presence of a superficial layer of mud with poor stiffness/resistance, a frequent case in submerged areas, will increase the embedding depth by between  $1/3$  and  $2/3$  of its thickness. Furthermore, this study shows the interest of using stiffness matrix models over the embedment models for pile docks, which guarantees an error of less than 10% on the calculation of the maximum bending moment.

**Keywords:** Soil-structure interaction, lateral loads, piles, maritime, geotechnics

## Résumé

L'interaction pieux-terrain sous effort horizontal est critique dans le domaine maritime et fluvial. Depuis le dernier siècle, des théories françaises et des systèmes de modélisation ont progressé sur ce sujet. Les différentes complexités des lois d'interaction et des modèles de calcul permettent de trouver l'équilibre entre la finesse des résultats et le temps dédié au calcul. Afin d'optimiser le processus de conception, le présent Projet de Fin d'Etudes est destiné à l'analyse qualitative et quantitative des écarts des différents modèles, en s'appuyant sur un outil de prétraitement de données créé à cette fin et basé sur la norme NF P94 -262 pour les lois d'interaction horizontales.

Pour une géométrie constante, du type duc d'Albe ou quai sur pieux, la méthodologie suivie consiste à réaliser plusieurs analyses qui traitent l'influence de la durée de chargement, la raideur du sol et la présence de vase sur des paramètres de dimensionnement tels que le moment fléchissant, le déplacement ou le rapport de butée mobilisable/butée mobilisée.

L'outil de prétraitement et le logiciel SAP2000 sont utilisés pour mener ces analyses en fonction des différentes modélisations du terrain : ressorts élastoplastiques, matrices de raideur linéaires ou encastremements.

Les analyses de l'influence de la raideur du sol et du rapport de butée permettent de prédire la profondeur d'encastrement équivalente pour trouver le même moment maximal que le modèle élastoplastique, située entre  $1\emptyset$ - $1.5\emptyset$ , ou pour le déplacement maximal, entre  $4\emptyset$ - $4.5\emptyset$ . Une moyenne de ces résultats est la valeur  $3\emptyset$ , classiquement recommandée mais jamais proprement justifiée. Les analyses de la durée de chargement ou le type de sol (cohérent/frottant) montrent une variation de ces valeurs de jusqu'à 10% pour le moment ou le déplacement nul. Les différences peuvent aller plus loin pour le déplacement maximal, très conditionné par la raideur et le rapport de butée. La présence d'une couche de vase superficielle de faible raideur, un cas fréquent des zones submergées, augmentera la profondeur d'encastrement entre  $1/3$  et  $2/3$  de son épaisseur.

Par ailleurs cette étude montre l'intérêt d'utiliser des matrices de raideur à des encastremements pour la création des modèles de quais sur pieux, en garantissant une erreur inférieure à 10% sur le calcul du moment fléchissant.

**Mots-clés :** Interaction sol-structure, sol-pieu, interaction latérale, efforts horizontaux, pieux, maritime.

# Índice de contenidos

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Agradecimientos.....                                                                         | 2  |
| Resumen .....                                                                                | 3  |
| Abstract .....                                                                               | 4  |
| Résumé .....                                                                                 | 5  |
| Índice de contenidos.....                                                                    | 6  |
| Índice de tablas.....                                                                        | 8  |
| Índice de figuras .....                                                                      | 9  |
| Glosario .....                                                                               | 10 |
| Índice de Anexos .....                                                                       | 11 |
| 1. Introducción .....                                                                        | 12 |
| 2. Teoría y Reglamentación .....                                                             | 15 |
| 2.1. Modelización al estado de ruptura del suelo .....                                       | 16 |
| Método de Blum.....                                                                          | 16 |
| Presión ultima.....                                                                          | 16 |
| 2.2. Mecanismo de reacción lateral de los pilotes.....                                       | 17 |
| Curvas p-y .....                                                                             | 17 |
| Fascículo 5 du Dossier FOND 72 .....                                                         | 17 |
| Notice STC PM N°86.4.....                                                                    | 17 |
| Norma NF-P94-262.....                                                                        | 17 |
| 2.3. Teoría del Anexo I de la norma NF-P94-262.....                                          | 18 |
| 3. Creación de un útil de pretratamiento para SAP2000 .....                                  | 23 |
| 2.4. Pestaña DAC .....                                                                       | 25 |
| 2.5. Pestaña muelle sobre pilotes .....                                                      | 27 |
| 4. Comparación de modelos simplificados para un pilote aislado .....                         | 28 |
| 4.1. Parámetros importantes para la concepción .....                                         | 28 |
| 4.2. Análisis de la influencia de la rigidez del suelo y del cociente de empuje pasivo... 31 |    |
| 4.3. Análisis de la influencia de la duración de la carga y del tipo de suelo.....           | 36 |
| 4.4. Análisis de la presencia de una capa de suelo superficial de pobre calidad.....         | 40 |
| 4.5. Matriz de rigidez para un pilote aislado .....                                          | 42 |
| 5. Comparación de modelos simplificados para muelles de pilotes.....                         | 45 |

|      |                                                                                                              |    |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1. | Tipos de modelos simplificados analizados .....                                                              | 45 |
| 5.2. | Análisis de la influencia de la rigidez del suelo para modelos de empotramientos y matrices de rigidez ..... | 48 |
| 5.3. | Análisis de la presencia de una capa de suelo superficial de pobre calidad.....                              | 52 |
| 6.   | Conclusión.....                                                                                              | 56 |
|      | Bibliografía.....                                                                                            | 60 |
|      | Anexos.....                                                                                                  | 62 |
|      | Anexo 1 : Código de la Macro de preprocesamiento de datos DAC .....                                          | 63 |
|      | Anexo 2 : Código de la Macro de preprocesamiento de datos QSP .....                                          | 75 |
|      | Anexo 3: Zoom sobre las gráficas de profundidades equivalentes .....                                         | 85 |
|      | Anexo 4: Comparación de los errores de MISS QSP.....                                                         | 97 |

## Índice de tablas

|                                                                                                                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Tabla 1 : Coeficiente reológico del método presiométrico [18].....</i>                                                                                                  | <i>20</i> |
| <i>Tabla 2 : Diámetros de profundidad equivalentes entre un modelo elastoplástico y uno empotrado.....</i>                                                                 | <i>34</i> |
| <i>Tabla 3 : Comparación de errores de un pilote aislado modelizado con un empotramiento o una matriz de rigidez contra una modelización elastoplástica no lineal.....</i> | <i>43</i> |
| <i>Tabla 4 : Comparación de resultados de las 3 modelizaciones de un muelle sobre pilotes para varios casos de carga .....</i>                                             | <i>49</i> |
| <i>Tabla 5 : Comparación de resultados de 3 modelizaciones de un muelle sobre pilotes según el espesor de la capa de limo y la rigidez del suelo.....</i>                  | <i>54</i> |

## Índice de figuras

|                                                                                                                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Figura 1 : Ejemplos de la presencia de pilotes en obras marítimas [biblioteca VCMF].....</i>                                                                             | <i>12</i> |
| <i>Figura 2 : Ejemplos de modelizaciones no lineares .....</i>                                                                                                              | <i>13</i> |
| <i>Figura 7 : Ley de interacción para una sollicitación de corta duración [18].....</i>                                                                                     | <i>19</i> |
| <i>Figura 8 : Ley de interacción para una sollicitación de muy corta duración [18] .....</i>                                                                                | <i>21</i> |
| <i>Figura 10 : Ley de interacción modificada para la presencia de un talud [18] .....</i>                                                                                   | <i>22</i> |
| <i>Figura 11 : Ejemplo del código y salida de resultados con CGB.....</i>                                                                                                   | <i>23</i> |
| <i>Figura 12 : Ejemplo de la pestaña de pretratamiento de datos para un pilote aislado .....</i>                                                                            | <i>25</i> |
| <i>Figura 13 : Proceso de pretratamiento – eleccion e insercion de datos en SAP2000.....</i>                                                                                | <i>26</i> |
| <i>Figura 14 : Ejemplo de la insercion de datos en la pestaña de muelle sobre pilotes.....</i>                                                                              | <i>27</i> |
| <i>Figura 15 : Ejemplo de la salida en SAP2000 para un muelle sobre pilotes .....</i>                                                                                       | <i>27</i> |
| <i>Figura 16 : Diagrama de momentos flectores (según resortes elastoplásticos o empotramiento)</i><br><i>.....</i>                                                          | <i>29</i> |
| <i>Figura 17 : Influencia de la rigidez y el cociente de empuje pasivo sobre las profundidades de</i><br><i>empotramiento, desplazamiento y momento equivalente .....</i>   | <i>32</i> |
| <i>Figura 18 : Influencia del tipo de suelo y de la duración de la carga sobre las profundidades</i><br><i>de empotramiento, desplazamiento y momento equivalente .....</i> | <i>36</i> |
| <i>Figura 19 : Diferencia entre los empujes pasivos movilizables de un suelo cohesivo y uno</i><br><i>granular.....</i>                                                     | <i>38</i> |
| <i>Figura 20 : Influencia del espesor de la capa de limo sobre las profundidades de</i><br><i>empotramiento, desplazamiento y momento equivalente .....</i>                 | <i>41</i> |
| <i>Figura 22: Tres posibles modelizaciones de un muelle sobre pilotes.....</i>                                                                                              | <i>46</i> |
| <i>Figura 22 : Geometría del muelle modelizado – modelo elastoplástico .....</i>                                                                                            | <i>46</i> |
| <i>Figura 23 : Combinaciones de cargas analizadas.....</i>                                                                                                                  | <i>47</i> |
| <i>Figura 24 : Comparación de momentos entre un pilote empotrado y una rigidez equivalente</i><br><i>.....</i>                                                              | <i>50</i> |
| <i>Figura 25 : Comparación de resortes ortogonales y axiales.....</i>                                                                                                       | <i>50</i> |
| <i>Figura 26 : Profundidades equivalentes entre los diferentes modelos de muelles sobre pilotes</i><br><i>.....</i>                                                         | <i>51</i> |
| <i>Figura 27 : Profundidades equivalentes entre los modelos de muelles sobre pilotes afectados</i><br><i>por el limo .....</i>                                              | <i>52</i> |
| <i>Figura 28 : Errores esperados para modelos de empotramientos y de matrices de rigidez ...</i>                                                                            | <i>55</i> |

## Glosario

AO : Appel d’Offre – Licitación

API : American Petroleum Institute

DAC : Duc d’Albe pour accostage – Duque de Alba de atraque

DAM : Duc d’Albe pour amarrage – Duque de Alba de amarre

DT : Direction Technique – Dirección Técnica

ELS : Etat Limite Service – Estado Limite de Servicio

ELU : Etat Limite Ultime – Estado Limite Ultimo

ENPC : Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

ISS : Interaction sol-structure – Interacción suelo-estructura

MISS : Modèle d’interaction sol-structure – Modelo de interacción suelo-estructura

$M_{max}$  : Moment fléchissant maximal – Momento flector máximo

PFE : Projet de Fin d’Etudes – Trabajo de Fin de Master (TFM)

QSP : Quai sur pieux – Muelle sobre pilotes

SF butée : « Safety Factor » ou rapport de butée mobilisable sur butée mobilisée. – Cociente de empuje pasivo movilizable/movilizado

VCMF : VINCI Construction Maritime et Fluvial

$V_{max}$  : Effort tranchant maximal – Esfuerzo Cortante máximo

$\delta_{max}$  : Déplacement maximal, en tête de pieu – Desplazamiento máximo

$\varnothing$  : Diamètre du pieu – Diámetro del pilote

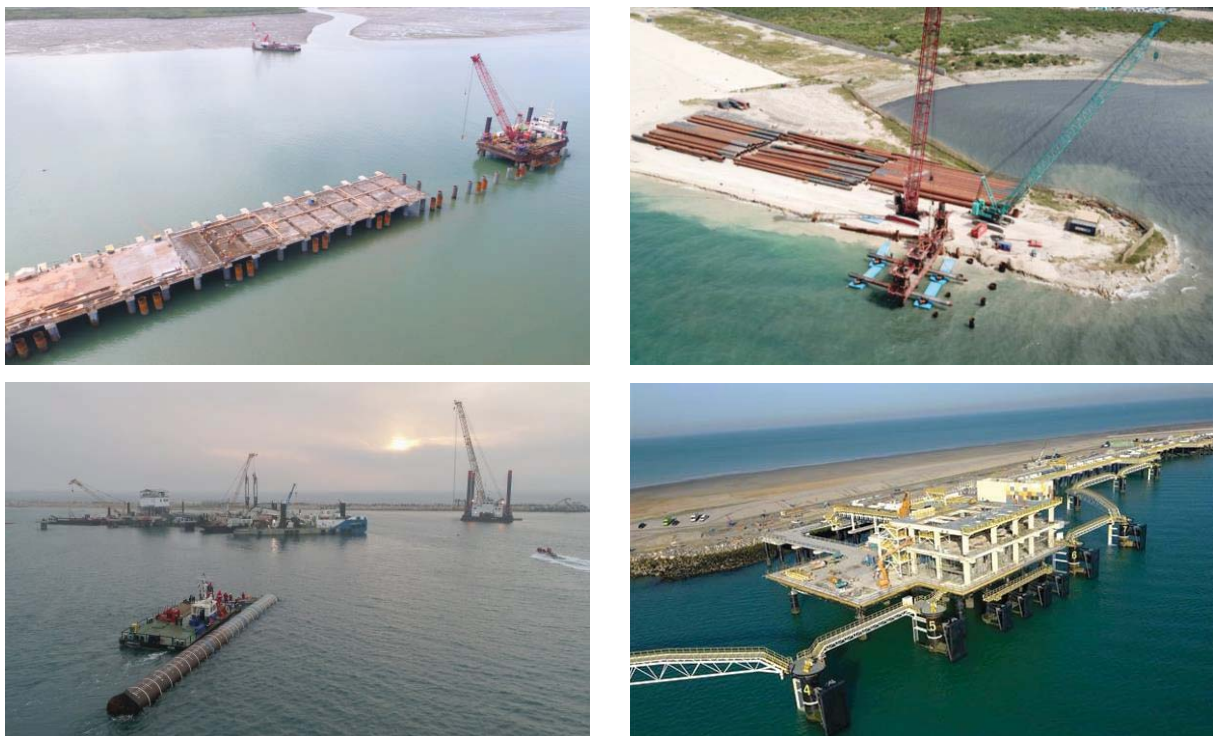
## Índice de Anexos

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| Anexo 1 : Código de la Macro de preprocesamiento de datos DAC .....  | 63 |
| Anexo 2 : Código de la Macro de preprocesamiento de datos QSP .....  | 75 |
| Anexo 3: Zoom sobre las gráficas de profundidades equivalentes ..... | 85 |
| Anexo 4: Comparación de los errores de MISS QSP .....                | 97 |

## 1. Introducción

---

La interacción entre los pilotes y el suelo bajo acciones horizontales es fundamental para las estructuras marítimas o fluviales sobre pilotes: duques de alba, muelles sobre pilotes, pantalanés, muros pantalla, etc. En efecto, en estas estructuras, las fuerzas horizontales (amarre y/o atraque, presión de las tierras, etc.) son a menudo mucho mayores que en otros ámbitos de la construcción donde predominan las cargas verticales. Por ello, la interacción entre el suelo y los pilotes es fundamental



*Figura 1 : Ejemplos de la presencia de pilotes en obras marítimas [biblioteca VCMF]*

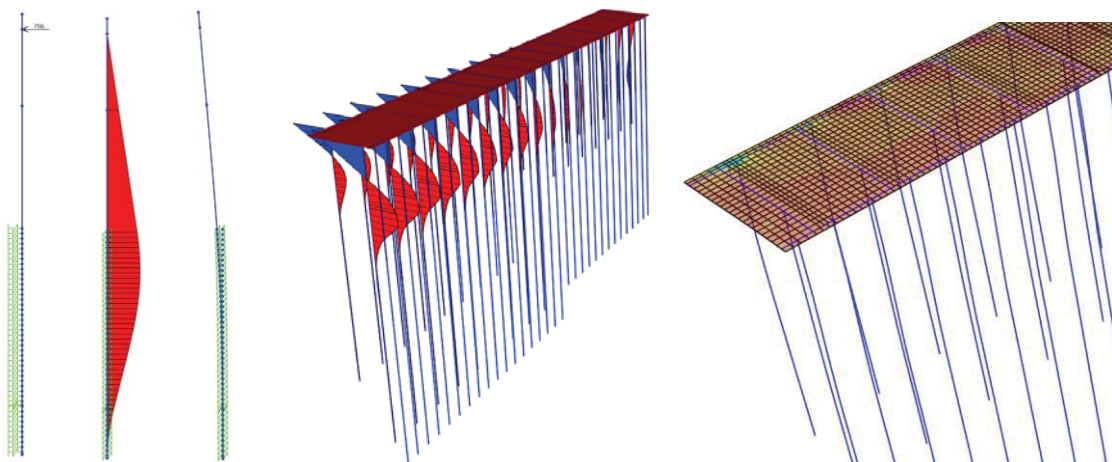
Sin embargo, la teoría de la interacción lateral entre el suelo y la estructura es limitada, y existen varias leyes de comportamiento diferentes para modelarla. En Francia, esta se basa en una serie de recomendaciones relacionadas con las pruebas presiométricas y penetrométricas y nociones semiprobabilísticas que datan del siglo pasado. Se recogen y condensan en el Anexo Nacional del Eurocódigo 7, que tiene carácter de aplicación obligatoria. Entre ellas, destaca la Ley de Menard, que se estudiará en este documento. En España, el anexo ni siquiera está disponible y los ingenieros tienen que basarse en diferentes normativas, como la "Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras" [14], las "Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas ROM 0.5-05" [20] y el "Código Técnico de la Edificación" [13], cuya parte sobre la interacción lateral es

muy vaga y discutible, también del siglo pasado. A nivel más internacional, están las curvas de las recomendaciones del American Petroleum Institut.

Además, el ingeniero dispone de varias opciones de modelización, más o menos refinadas, como la formulación analítica lineal, la modelización del pilote acoplada con elementos elastoplásticos no lineales, la utilización de matrices de rigidez elásticas representativas en el empotramiento ficticio del pilote, ...

Así, los enfoques lineales analíticos existentes pueden ser suficientes para suelos rígidos y resistentes en los que las zonas de plastificación permanecen muy localizadas, pero resultarán insuficientes en suelos blandos que pueden plastificarse en una altura significativa debido a sus bajas presiones límite.

Del mismo modo, la modelización fina es necesaria para los duques de alba, que son muy sensibles a los desplazamientos, pero suele ser demasiado engorrosa para las estructuras más grandes, como los muelles de pilotes, para los que suele ser preferible utilizar matrices de rigidez.



*Figura 2 : Ejemplos de modelizaciones no lineares*

La cuestión que se aborda en este Proyecto de Fin de Carrera es, por tanto, la cuantificación de las magnitudes de las desviaciones relacionadas con las diferentes leyes de comportamiento, así como los diferentes grados de aproximación.

Para ello, se presenta una revisión bibliográfica que pone de relieve una selección de los principales tipos de leyes de interacción pilote-suelo y modelos estructurales.

A continuación, para facilitar el análisis de los diferentes casos, se desarrolla un útil de preprocesamiento que permite implementar fácilmente diferentes leyes en el software SAP2000 y modificar los parámetros. Se basa en la norma NF P94-262, del anexo nacional francés del Eurocódigo 7, y permite modelar rápidamente dos estructuras típicas del ámbito marítimo: los duques de alba y los muelles sobre pilotes. Esta herramienta sustituye a un software interno de VINCI que ya no es funcional con los nuevos sistemas operativos Windows. Ofrece una ventaja económica a la empresa al reducir el tiempo de modelado y evitar la compra de nuevas licencias de software externas.

Posteriormente, se realiza un estudio sobre la influencia de diferentes parámetros geotécnicos como los asociados a la rigidez del suelo, el cociente de empuje pasivo movilizable/movilizado o la presencia de una capa superior de limo de mala calidad. Los resultados se analizaron para cuantificar el grado de precisión de los modelos en tres parámetros principales: las profundidades ( $x_0$ ) del momento flector máximo, el desplazamiento máximo de la cabeza y el punto de desplazamiento cero.

El análisis concluye con recomendaciones para la modelización en función del tipo de estructuras y terrenos encontrados en la fase de proyecto, lo que permite cuantificar la amplitud de las desviaciones previstas para cada situación estudiada.

## 2. Teoría y Reglamentación

---

A diferencia de la interacción suelo-estructura (ISS) para las fuerzas verticales, actualmente no existen normas importantes para analizar la interacción para las fuerzas horizontales. La normativa francesa se basa en una serie de conceptos y recomendaciones semiprobabilísticos relacionados con las pruebas presiométricas y penetrométricas que datan del siglo pasado, recogidos en un anexo nacional de la CE7.

En este apartado se hará una revisión no exhaustiva de la problemática para el análisis de la interacción lateral entre suelo y pilote, describiendo la metodología actual según la bibliografía consultada.

Se pueden distinguir dos clases de problemas:

- El comportamiento de las cimentaciones profundas hincadas en un suelo estable y sometidos a fuerzas horizontales de vuelco de la estructura;
- El comportamiento de las cimentaciones profundas asentadas en suelos inestables, es decir, sujetas a movimientos predominantemente horizontales y, por tanto, sometidas a fuerzas horizontales del suelo.

Sin embargo, en el caso de las cimentaciones profundas esbeltas, es decir, los pilotes, existe un vínculo entre ambos problemas. Este vínculo se basa, al igual que para las fuerzas verticales, en el carácter local de la interacción entre el suelo y el pilote. La respuesta de un pilote cargado lateralmente es un problema ISS complicado ya que la deflexión depende de la reacción del suelo y al mismo tiempo la reacción del suelo está influenciada por la deflexión del pilote.

A continuación se presentan algunas metodologías de cálculo por orden de aparición y complejidad. En primer lugar, las teorías relacionadas con el estado de fallo del suelo, seguidas de la noción de mecanismo de reacción lateral de los pilotes, nacida para las situaciones en las que no se alcanza el fallo, y por último la normativa vigente en Francia, la norma NF P94-262.

## **2.1. Modelización al estado de ruptura del suelo**

### **Método de Blum**

...

### **Presión ultima**

...

## **2.2. Mecanismo de reacción lateral de los pilotes.**

### **Curvas p-y**

...

### **Fascículo 5 du Dossier FOND 72**

...

### **Notice STC PM N°86.4**

...

### **Norma NF-P94-262**

Para colmar una laguna normativa en materia de diseño y cálculo de cimentaciones, en 1993 apareció el Fascículo n° 62 - Título V de las "Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages de génie civil" del Cuaderno de cláusulas técnicas generales aplicables a los contratos de obras públicas adjudicados por cuenta del Estado [12]. Es la base para la creación, en 2012, de la primera norma nacional francesa de aplicación del Eurocódigo 7 para cimentaciones profundas, la NF P 94-262 [18]. En la fecha de publicación de la norma, no existe ninguna obra europea o internacional que trate el mismo tema.

Esta norma describe el comportamiento de las cimentaciones profundas y proporciona las reglas de justificación por cálculo en los estados límite últimos y en los estados límite de servicio. Se aplica al diseño de cimentaciones profundas cargadas axialmente en compresión o tensión o transversalmente, tanto si estas estructuras geotécnicas se instalan por procedimientos de hormigonado in-situ, hincas, vibración, trepanación ...

En la elaboración de este documento han participado, entre otros, doctores en geotecnia del IFSTTAR y profesores de la ENPC como Magnan, Frank, Burlon y Rocher-Lacoste.

La norma recopila las teorías francesas existentes sobre el comportamiento bajo cargas transversales, tal y como se ha explicado anteriormente.

Básicamente, el comportamiento transversal de una cimentación profunda aislada debe caracterizarse por las relaciones entre el desplazamiento y la rotación de la cabeza del elemento y los esfuerzos cortantes y los momentos de flexión que se le aplican. Los tipos de leyes de reacción se distinguirán según la duración de la aplicación de la fuerza.

Se utiliza un modelo de punta libre. Es decir, se desprecia el rozamiento que puede desarrollarse entre el suelo y la base de la cimentación profunda, así como la excentricidad de la fuerza normal. Por lo tanto, se supone que los desplazamientos transversales y las rotaciones de la base de una cimentación profunda no movilizan ninguna reacción del suelo, es decir, el esfuerzo cortante y el momento flector son nulos en la base.

El procedimiento para construir las leyes de interacción a partir de los datos del presiómetro o del penetrómetro figura en el anexo I de la norma NF P 94-262 [18].

### **2.3. Teoría del Anexo I de la norma NF-P94-262**

#### **« Modelización del comportamiento transversal de una cimentación profunda a partir de ensayos de presiómetro y penetrómetro »**

Este apéndice trata del concepto más práctico para el ingeniero, la construcción de las leyes de interacción suelo-cimentación que describen el comportamiento transversal a partir de los resultados de los ensayos del presiómetro de Menard. Esta es la teoría utilizada para el dimensionamiento y es la base de la herramienta de cálculo creada en el Departamento Técnico de VCMF.

El principio general admite que el suelo ejerce una reacción perpendicular a su eje en cada sección del elemento, que es función del desplazamiento transversal relativo de la sección considerada. Esta reacción se compone de:

- Las presiones frontales, modeladas por una presión uniforme ejercida sobre la mayor anchura del elemento perpendicular a la dirección del desplazamiento, B.
- Presiones de rozamiento transversales en las partes del perímetro paralelas a la dirección del movimiento.

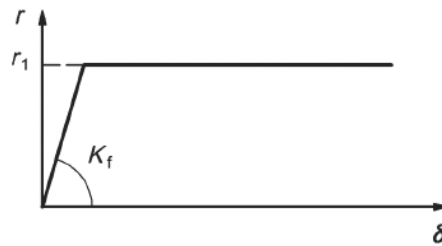
La ley de movilización de la reacción global a considerar es la suma de la reacción frontal y tangencial. Para los casos de obras marítimas, los pilotes son normalmente circulares (DACs, DAMS, muelles...) y, en consecuencia, la presión frontal se ejerce uniformemente sobre una anchura igual al diámetro del pilote. Las presiones transversales se reducen por tanto a dos puntos infinitesimales.

La ley distingue los casos de interacción según la duración de la aplicación de las cargas.

### **Solicitaciones de corta duración de aplicación**

La ley de movilización de la reacción frontal  $r = pB$  en función del desplazamiento  $\delta$  del pilote debe ser definida por:

- Un segmento de recta pasando por el origen y de pendiente  $K_f$ .  $K_f$  es el módulo lineal de movilización de la presión frontal para un elemento de la cimentación profunda.
- Un límite  $r_1$



*Figura 3 : Ley de interacción para una sollicitación de corta duración [18]*

La evaluación de  $K_f$  y de  $r_1$  a partir de los resultados del ensayo de presión de Menard debe realizarse como sigue:

El módulo  $K_f$  se calcula a partir de una de las dos fórmulas siguientes:

$$K_f = \frac{12E_M}{\frac{4}{3} \frac{B_0}{B} \left[ 2,65 \frac{B}{B_0} \right]^\alpha + \alpha} \text{ cuando } B \geq B_0$$

$$K_f = \frac{12E_M}{\frac{4}{3} [2,65]^\alpha + \alpha} \text{ cuando } B \leq B_0$$

Donde:

$E_M$  es el módulo presiométrico de Ménard

$B$  es la anchura del elemento perpendicularmente al sentido del desplazamiento. Igual al diámetro cuando se trata de un tubo.

$B_0$  es una anchura de referencia tomada igual a 0,60 m

$\alpha$  es un coeficiente reológico que caracteriza el terreno en el método presiométrico

| Terrain <sup>a</sup>                                                                                                                                                 | Tourbe   | Argile    |          | Limon     |          | Sable     |          | Grave     |          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
|                                                                                                                                                                      | $\alpha$ | $E_M/p_l$ | $\alpha$ | $E_M/p_l$ | $\alpha$ | $E_M/p_l$ | $\alpha$ | $E_M/p_l$ | $\alpha$ |
| <b>I</b>                                                                                                                                                             | -        | > 16      | 1        | > 14      | 2/3      | > 12      | 1/2      | > 10      | 1/3      |
| <b>II</b>                                                                                                                                                            | 1        | 9 - 16    | 2/3      | 8 - 14    | 1/2      | 7 - 12    | 1/3      | 6 - 10    | 1/4      |
| <b>III</b>                                                                                                                                                           | -        | 7 - 9     | 1/2      | 5 - 8     | 1/2      | 5 - 7     | 1/3      | -         | -        |
| a I : terrain surconsolidé ou très serré,<br>II : terrain normalement consolidé ou normalement serré,<br>III : terrain sous-surconsolidé altéré et remanié ou lâche. |          |           |          |           |          |           |          |           |          |

| Rocher            | $\alpha$ |
|-------------------|----------|
| Très peu fracturé | 2/3      |
| Normal            | 1/2      |
| Très fracturé     | 1/3      |
| Très altéré       | 2/3      |

Tabla 1 : Coeficiente reológico del método presiométrico [18]

El límite  $r_1$  se toma igual a:

$$r_1 = Bp_f^*$$

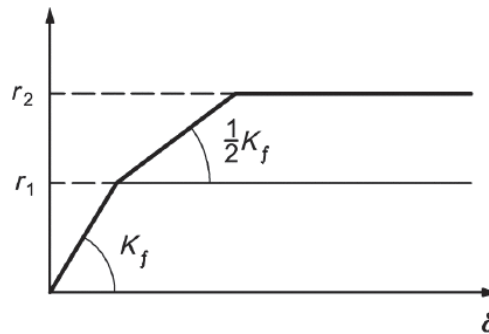
Donde  $p_f^*$  es la presión de fluencia neta.

### Solicitaciones de larga duración de aplicación

La reacción frontal está, en todos los casos, limitada por el valor  $r_1$  y los valores de los módulos que describen la movilización de las fuerzas resistentes en función del desplazamiento relativo se toman iguales a la mitad de los definidos para las tensiones de corta duración.

### **Solicitaciones de muy corta duración de aplicación**

Para las cargas accidentales muy breves (por ejemplo, choques con la llegada de un barco al atraque) o las cargas raras de corta duración, se acepta que las justificaciones se realicen sobre la base de un diagrama de interacción no lineal como:



*Figura 4 : Ley de interacción para una sollicitación de muy corta duración [18]*

El límite  $r_2$  se toma igual a :

$$r_2 = Bp_l^*$$

Donde  $p_l^*$  es la presión límite presiométrica neta.

Una ley secante lineal en sustitución de esta ley no lineal está justificada siempre que no se supere nunca el límite plástico.

### **Modificaciones cerca de la superficie del suelo**

La norma NF-P94-262 adopta la propuesta de Ménard [11] ya mencionada en el párrafo anterior para los valores de  $p_u$  cerca de la superficie. El módulo lineal del suelo y el valor del límite plástico se reducen de acuerdo con las siguientes disposiciones:

- La profundidad  $z_c$  sobre la que se aplica esta reducción, contada a partir de la superficie del suelo después de las obras, se considera igual a  $2B$  para los suelos cohesivos y  $4B$  para los suelos granulares.
- Para  $z < z_c$  las leyes de tensión-desplazamiento definidas deben ser modificadas por una afinidad de eje  $\delta$  y dirección  $r$  de relación:

$$\frac{1}{2} \left( 1 + \frac{z}{z_c} \right)$$

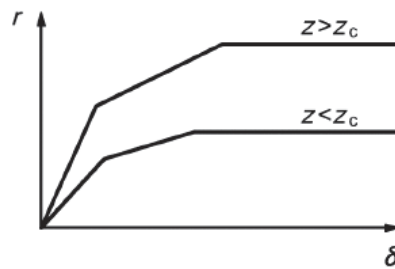


Figura 9 : Ley de interacción modificada en la superficie del suelo [18]

### **Caso de un elemento implantado en talud**

La norma incluye una evolución de la recomendación ya recomendada por el LCPC y el SETRA de no tener en cuenta el suelo hasta una profundidad tal que el espesor horizontal del suelo susceptible de ser movilizado en presión pasiva (distancia horizontal del pilote respecto al talud) sea de  $5B$  cuando la fuerza horizontal aplicada a la cimentación se ejerce en la dirección del talud. En los casos en los que la fuerza se aplica exclusivamente en la dirección opuesta a la de la pendiente, no es necesario aplicar las tolerancias prescritas a continuación.

La reacción frontal y el rozamiento lateral del suelo de arriba deben determinarse sabiendo que:

- Se mantienen las pendientes de las leyes elementales de movilización de la presión frontal y de la posible fricción lateral;
- El valor del límite plástico de estas leyes se varía linealmente entre el punto ficticio de intersección del talud con el eje del elemento citado y la cota citada en  $5B$ , asignando un valor cero en el punto de intersección del eje del pilote y el plano del talud.

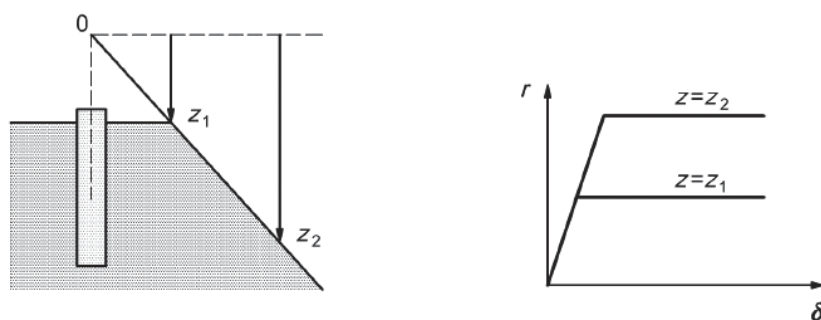


Figura 5 : Ley de interacción modificada para la presencia de un talud [18]

### 3. Creación de un útil de pretratamiento para SAP2000

En los últimos años, un software interno de nodos y barras, denominado CGB, ha permitido tener en cuenta la interacción suelo-estructura mediante la modelización del comportamiento elastoplástico del suelo. Ha sido diseñado por el departamento de informática de Campenon Bernard, ahora filial del grupo VINCI. Este antiguo software (la última versión data de 1987) fue diseñado con macros para Microsoft Word. Un código escrito en Word permitía definir una estructura sencilla del tipo duque de Alba e implementar las leyes de interacción elastoplástica, y una austera interfaz de salida permitía consultar los resultados de fuerza cortante, momento flector y desplazamiento para el pilote. A continuación, se muestran algunas capturas de pantalla de este software:

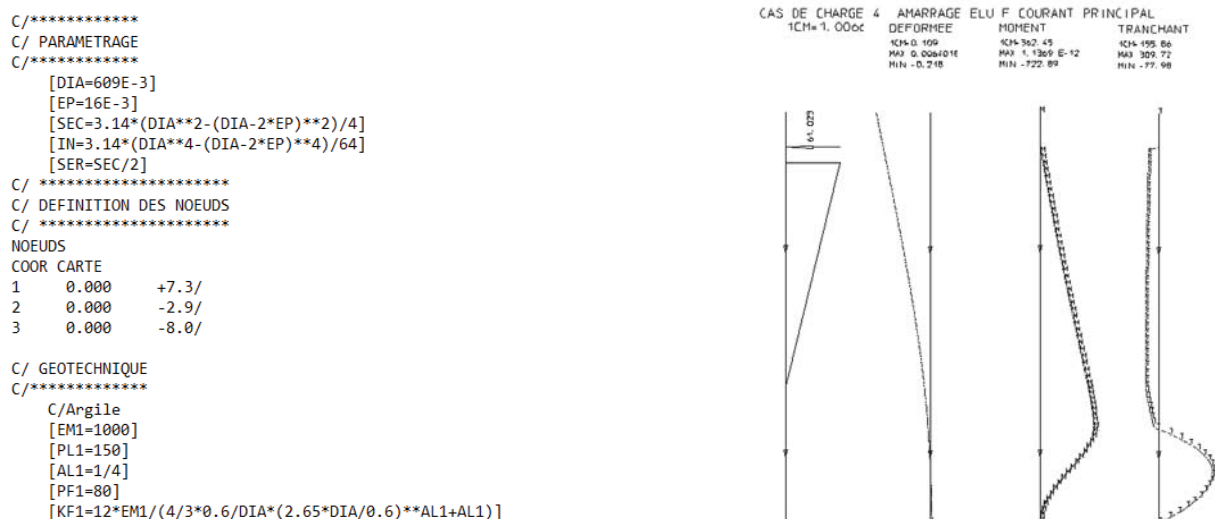


Figura 6 : Ejemplo del código y salida de resultados con CGB

En 2021, las actualizaciones del sistema operativo Windows hicieron que el CGB quedara finalmente inutilizado y hubiese que buscar una nueva solución.

Por ello, se consideró utilizar un programa informático de elementos finitos, el SAP2000, normalmente utilizado para el cálculo de otro tipo de estructuras. El programa es más potente, ya que permite el cálculo multilíneal con su versión "Avanzada", pero tiene algunos inconvenientes:

- La creación del modelo es complicada; hay que definir varios puntos y resortes, especialmente si la estructura es compleja (muelle de pilotes, muelle)
- El software no es gratuito y, por tanto, el número de licencias es limitado

Para facilitar la creación del modelo de estructura y agilizar su uso, se ideó una herramienta de preprocesamiento de datos. La idea era introducir los parámetros básicos en una hoja de Excel que definiera todas las entradas necesarias para SAP2000. La elección de esta solución se justifica por el uso generalizado de Excel en VCMF, así como por la buena interacción entre ambos programas informáticos. SAP2000 dispone de tablas interactivas de entrada y salida de datos adaptadas a Excel. El proceso de cálculo de los datos que se introducen en SAP2000 se realiza con una macro de Microsoft Visual Basic en código de aplicación de Visual Basic (VBA) que puso en marcha un ingeniero del Departamento Técnico, Antoine Labonde. El código, a grandes rasgos, realiza la definición geométrica y mecánica de la estructura. Considera los diferentes niveles del pilote (cabeza, pie y suelo natural) y se encarga de definir los puntos y muelles en función de la altura de corte para el cálculo de elementos finitos. Las leyes de interacción suelo-estructura se basan en todas las prescripciones dadas en la norma NF-P94-262, y más concretamente en el apéndice I para el ensayo presiométrico de Menard, explicado anteriormente.

Un primer objetivo del PFE era terminar y verificar esta herramienta.

Una vez comprendido y revisado el código, se añadió la posibilidad de tener en cuenta los siguientes efectos:

- Superficie: Minimización del módulo lineal y del soporte plástico para las regiones cercanas a la superficie en función de si el suelo es cohesivo o granular.
- Talud: Reducción del soporte plástico para las regiones afectadas por la presencia de una pendiente.
- Carga de muy corta duración: Modificación de la ley de interacción con 2 regiones diferentes para la fase elástica.

La herramienta ofrece la posibilidad de modelar tanto un pilote individual (DAC/DAM) como una pila sobre pilotes, definiendo no sólo todos los pilotes sino también la losa que hay encima. Como es lógico, el tamaño y la complejidad de los datos es mayor en este último caso y, por tanto, la utilidad de la hoja es más evidente.

A continuación, se muestra la idea general de la hoja de cálculo, con imágenes de la interfaz gráfica para el usuario; y en el Apéndice está todo el código VBA creado con explicaciones de cada parte.

## 2.4. Pestaña DAC

En primer lugar, se solicita un conjunto de datos estructurales, geotécnicos y de las leyes de interacción (los coloreados en azul en la imagen inferior).

**Caract. pieu**

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Type de profilé | Pipe  |
| diamètre forage | 1,5   |
| diamètre        | 1,5   |
| épaisseur       | 0,018 |
| Nuance          | S235  |

**Niveaux pieu**

|      |     |
|------|-----|
| Tête | 6   |
| TN   | -4  |
| Pied | -20 |

**Géotechnique**

| Dénomination                    | Toit [m NGF] | Base [m NGF] | $E_m$ [MPa] | $p_1^*$ [MPa] | $p_2^*$ [MPa] | $\alpha$ |
|---------------------------------|--------------|--------------|-------------|---------------|---------------|----------|
| Alluvions modernes limoneuses   | -4,00        | -7,00        | 2,0         | 0,10          | 0,20          | 0,33     |
| Alluvions anciennes graveleuses | -7,00        | -9,00        | 15,0        | 0,75          | 1,50          | 0,33     |
| Craie altérée                   | -9,00        | -18,00       | 18,0        | 0,90          | 1,80          | 0,67     |
| Craie compacte 1                | -18,00       | -20,00       | 36,0        | 1,80          | 3,60          | 0,67     |
| Neant                           | -20,00       | -10000,00    | 10,0        | 5,00          | 5,00          | 0,67     |
| Neant                           | -10000,00    | -10000,00    | 10,0        | 5,00          | 5,00          | 0,67     |
| Neant                           | -10000,00    | -10000,00    | 10,0        | 5,00          | 5,00          | 0,67     |
| Neant                           | -10000,00    | -10000,00    | 10,0        | 5,00          | 5,00          | 0,67     |
| Neant                           | -10000,00    | -10000,00    | 10,0        | 5,00          | 5,00          | 0,67     |
| Neant                           | -10000,00    | -10000,00    | 10,0        | 5,00          | 5,00          | 0,67     |

**Effets pour la loi d'interaction**

|                        |                   |
|------------------------|-------------------|
| Comportement sol       | Très courte durée |
| Pente                  | Oui               |
| Direction pente        | X+                |
| H/V                    | 1,00              |
| Niveau fin pente       | -8                |
| Hauteur découpe        | 0,20              |
| Type du sol surfacique | Cohérent-2B       |

Niveau jusqu'auquel prendre en compte les effets de:  
Surface -7  
Talus -8

Figura 7 : Ejemplo de la pestaña de pretratamiento de datos para un pilote aislado

Una vez pulsado el botón de generar, se ejecuta la macro VBA: se define la geometría y se calculan las leyes de interacción para cada resorte teniendo en cuenta los parámetros geotécnicos, el tiempo de carga o la presencia de un talud.

Cuando se ejecuta el código, se muestran varias pestañas con los datos de salida, que luego se copiarán y pegarán en las tablas del editor interactivo de SAP2000 para la creación directa del modelo. Las pestañas son:

*Connectivity-Frame, Connectivity-Link, Joint Coordinates, Frame Section Assignments, Link Property Assignments, Joint Restraint Assignments, General Frame Properties, General Link Properties, Multilinear Link Properties, General Material Properties, Basic Mechanical Material Properties, Steel Data Material Properties.*

Connectivity - Frame   Connectivity - Link   Frame Section Assignments   Frame Props 01 - General   Joint Coordinates   Joint Restraint Ass...

TABLE:

| Joint | CoordSys | CoordType | Xoft<br>m | Y<br>m | T<br>Degrees | Z<br>m | SpecialIt |
|-------|----------|-----------|-----------|--------|--------------|--------|-----------|
| PT    | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | 6            | Yes    |           |
| PP    | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | -20          | Yes    |           |
| P-4,1 | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | -4,1         | Yes    |           |
| P-4,3 | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | -4,3         | Yes    |           |
| P-4,5 | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | -4,5         | Yes    |           |
| P-4,7 | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | -4,7         | Yes    |           |
| P-4,9 | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | -4,9         | Yes    |           |
| P-5,1 | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | -5,1         | Yes    |           |
| P-5,3 | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | -5,3         | Yes    |           |

Choose Tables for Interactive Editing

MODEL DEFINITION (12 of 1131 tables selected)

- ☒ System Data
- ☒ Property Definitions
  - ☒ Material Properties
  - ☒ Frame Section Properties
  - ☒ Cable Properties
  - ☒ Tendon Properties
  - ☒ Hinge Properties
  - ☒ Area Section Properties
  - ☒ Solid Properties
  - ☒ Link Properties
  - ☒ Section Designer Properties
  - ☒ Relator Sets
  - ☒ Named Property Sets
- ☒ Load Pattern Definitions
- ☒ Other Definitions
- ☒ Load Case Definitions
- ☒ Bridge Data
- ☒ Connectivity Data
  - ☒ Joint Coordinates
  - ☒ Table: Joint Coordinates
  - ☒ Object Connectivity
  - ☒ Joint Assignments
  - ☒ Frame Assignments

Load Patterns (Model Def.)

Select Load Patterns...

1 of 1 Selected

Options

☐ Selection Only

☐ Show All Fields

☒ Expose All Input Tables

Named Sets

Show Named Set

Interactive Database Editing - Joint Coordinates

File   Excel   Edit   View   Options

Joint Coordinates

| Joint    | CoordSys | CoordType | Xoft<br>m | Y<br>m | T<br>Degrees | Z<br>m | SpecialIt | QUAD |
|----------|----------|-----------|-----------|--------|--------------|--------|-----------|------|
| 1 PT     | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | 6            | Yes    |           |      |
| 2 PP     | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | 20           | Yes    |           |      |
| 3 P-4,1  | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | 4,1          | Yes    |           |      |
| 4 P-4,3  | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | 4,3          | Yes    |           |      |
| 5 P-4,5  | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | 4,5          | Yes    |           |      |
| 6 P-4,7  | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | 4,7          | Yes    |           |      |
| 7 P-4,9  | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | 4,9          | Yes    |           |      |
| 8 P-5,1  | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | 5,1          | Yes    |           |      |
| 9 P-5,3  | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | 5,3          | Yes    |           |      |
| 10 P-5,5 | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | 5,5          | Yes    |           |      |
| 11 P-5,7 | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | 5,7          | Yes    |           |      |
| 12 P-5,9 | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | 5,9          | Yes    |           |      |
| 13 P-6,1 | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | 6,1          | Yes    |           |      |
| 14 P-6,3 | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | 6,3          | Yes    |           |      |
| 15 P-6,5 | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | 6,5          | Yes    |           |      |
| 16 P-6,7 | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | 6,7          | Yes    |           |      |
| 17 P-6,9 | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | 6,9          | Yes    |           |      |
| 18 P-7,1 | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | 7,1          | Yes    |           |      |
| 19 P-7,3 | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | 7,3          | Yes    |           |      |
| 20 P-7,5 | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | 7,5          | Yes    |           |      |
| 21 P-7,7 | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | 7,7          | Yes    |           |      |
| 22 P-7,9 | GLOBAL   | Cartesian | 0         | 0      | 7,9          | Yes    |           |      |

Model View   Apply to Model

Figura 8 : Proceso de pretratamiento – eleccion e insercion de datos en SAP2000.

## 2.5. Pestaña muelle sobre pilotes

La pestaña añade a la información anterior las definiciones de las coordenadas X e Y de los pilotes, así como los parámetros para modelar la losa:

|                 |                |        |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------|----------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| Abscises pieux  | Direction X    |        |      |      |      |      |      |      |      |
|                 | Identifiant    | A      | B    |      |      |      |      |      |      |
|                 | Distance       | 0      | 4,7  |      |      |      |      |      |      |
| Ordonnées pieux | Direction Y    |        |      |      |      |      |      |      |      |
|                 | Identifiant    | 1      | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
|                 | Distance       | 0,75   | 9,45 | 9,45 | 9,45 | 9,45 | 9,45 | 9,45 | 9,45 |
| Dalle           | Identifiant    | Tous   |      |      |      |      |      |      |      |
|                 | Tête           | 6      |      |      |      |      |      |      |      |
|                 | TN             | -4     |      |      |      |      |      |      |      |
|                 | Pied           | -20    |      |      |      |      |      |      |      |
|                 | Identifiant    | Dalle  |      |      |      |      |      |      |      |
|                 | distance fin X | 0      |      |      |      |      |      |      |      |
|                 | distance fin Y | 0,745  |      |      |      |      |      |      |      |
|                 | Matériau       | C40/50 |      |      |      |      |      |      |      |
|                 | Epaisseur      | 0,4    |      |      |      |      |      |      |      |
|                 | Submesh        | Oui    | 0,5  |      |      |      |      |      |      |
| Type de profilé | Pipe           |        |      |      |      |      |      |      |      |
| diamètre        | 1,5            |        |      |      |      |      |      |      |      |
| épaisseur       | 0,018          |        |      |      |      |      |      |      |      |
| Nuance          | S355           |        |      |      |      |      |      |      |      |

| Geotechnique              |                 |                 |                |                  |                  |          |
|---------------------------|-----------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|----------|
| Dénomination              | Toit<br>[m NGF] | Base<br>[m NGF] | $E_m$<br>[MPa] | $p_t^*$<br>[MPa] | $p_b^*$<br>[MPa] | $\alpha$ |
| Alluvions modernes lim.   | -4,00           | -7,00           | 2,0            | 0,10             | 0,20             | 0,33     |
| Alluvions anciennes grav. | -7,00           | -9,00           | 15,0           | 0,75             | 1,50             | 0,33     |
| Craie altérée             | -9,00           | -18,00          | 18,0           | 0,90             | 1,80             | 0,67     |
| Craie compacte 1          | -18,00          | -20,00          | 36,0           | 1,80             | 3,60             | 0,67     |
| Neant                     | -20,00          | -10000,00       | 10,0           | 5,00             | 5,00             | 0,67     |
| Neant                     | -10000,00       | -10000,00       | 10,0           | 5,00             | 5,00             | 0,67     |
| Neant                     | -10000,00       | -10000,00       | 10,0           | 5,00             | 5,00             | 0,67     |
| Neant                     | -10000,00       | -10000,00       | 10,0           | 5,00             | 5,00             | 0,67     |
| Neant                     | -10000,00       | -10000,00       | 10,0           | 5,00             | 5,00             | 0,67     |
| Neant                     | -10000,00       | -10000,00       | 10,0           | 5,00             | 5,00             | 0,67     |
| Neant                     | -10000,00       | -10000,00       | 10,0           | 5,00             | 5,00             | 0,67     |

|                  |              |
|------------------|--------------|
| Comportement sol | Longue durée |
| Pente            | Oui          |
| Direction pente  | X+           |
| H/V              | 1,00         |
| Niveau fin pente | -30          |

Figura 9 : Ejemplo de la insercion de datos en la pestaña de muelle sobre pilotes

A las pestañas de salida ya mencionadas, se suman pestañas para crear la losa de hormigón:

Connectivity-Area, Area Section Assignments, Area Auto Mesh Assignments, Area Section Properties, Concrete Data Material Properties

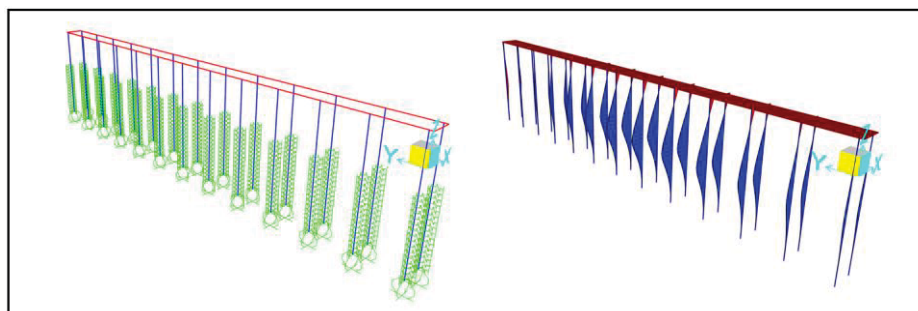


Figura 10 : Ejemplo de la salida en SAP2000 para un muelle sobre pilotes

## 4. Comparación de modelos simplificados para un pilote aislado

---

La herramienta de preprocesamiento será utilizada por el departamento técnico en combinación con SAP2000 para crear rápidamente modelos elastoplásticos durante la fase de licitación. También se utilizó para el objetivo principal del TFM: la comparación de modelos de diferente complejidad. Así, los modelos elastoplásticos se comparan con modelos más sencillos cuya rigidez está definida por un empotramiento o una matriz de rigidez a cierta profundidad. Los modelos más sencillos permiten, sin embargo:

- Diseño y cálculo más rápidos; no es despreciable cuando se trata de modelos múltiples, modelos con muchos pilotes (deflexiones, pilas) o iteraciones para optimizar el diseño.
- Evitar la necesidad de un cálculo no lineal, que sólo está disponible en la versión avanzada de SAP2000 (licencia un 60% más cara).

La comparación y el análisis de las diferencias entre los resultados proporcionan una serie de recomendaciones para la creación de estos modelos más simples según las condiciones geotécnicas o de carga.

A continuación se explican algunos de los parámetros que hay que tener en cuenta para este análisis.

### 4.1. Parámetros importantes para la concepción

Para comparar los modelos elastoplásticos con otros modelos simplificados, hay que tener en cuenta varios parámetros importantes de diseño y cálculo:

- Momento flector máximo:  $M_{max}$

El momento de flexión suele ser el parámetro decisivo para el cálculo ELU. La longitud de los pilotes provoca momentos más importantes que cortantes.

Para una carga horizontal en la cabeza del pilote como la que se utilizará en los modelos de este TFM, la curva del diagrama de momentos tendrá un aspecto diferente dependiendo de si se trata de un modelo MISS de tipo muelle elastoplástico o de tipo empotrado:

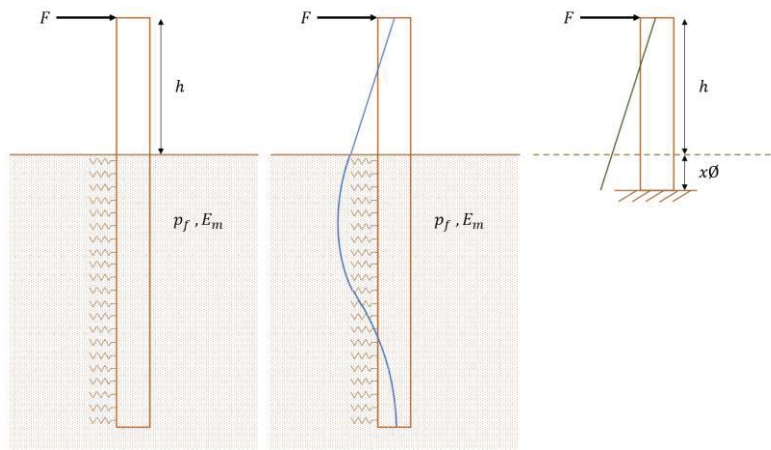


Figura 11 : Diagrama de momentos flectores (según resortes elastoplásticos o empotramiento)

Los modelos de muelles elastoplásticos tienen una curva con una parte lineal hasta la entrada en el suelo ( $M = F * h$ ) que cambia a una curva no lineal debido a la interacción con el suelo. Alcanzará su máximo en el suelo (más profundo si la calidad del suelo es mala) y será nulo al pie.

Los modelos que simplifican esta interacción empotrándose a una profundidad de  $x_0$  alcanzan el máximo  $M_{max} = F * (h + x_0)$

➤ Desplazamiento nulo:  $\delta = 0$

Habrà un punto de desplazamiento cero a cierta profundidad en el suelo  $x_0$ . Este punto suele estar muy cerca del punto donde la fuerza de cizallamiento es máxima.

➤ Desplazamiento máximo:  $\delta_{max}$

Desplazamiento máximo o desplazamiento de la cabeza. Este es un parámetro importante para el cálculo ELS. Suele ser limitado y juega un papel importante en el balance energético para el cálculo de un DAC.

Se encuentra con la ayuda de un software de cálculo no lineal. Para modelarlo linealmente, la fórmula analítica de resistencia de materiales para el desplazamiento máximo de una viga empotrada  $\delta = \frac{Fl^3}{3EI}$  da una aproximación suficientemente buena utilizando la profundidad donde el desplazamiento es cero. La elección de la profundidad  $x_0$  que proporciona el máximo desplazamiento es uno de los objetivos de este TFM.

➤ Cociente de empuje pasivo movilizable/movilizado:  $SF_{butée}$

Es un parámetro importante para analizar la estabilidad de la estructura. El empuje pasivo es una fuerza pasiva ejercida por el suelo sobre la estructura, en reacción a un desplazamiento efectivo. Se define como:

♦ El empuje pasivo movilizado: se calcula sumando las presiones de empuje sobre la altura del pilote; las presiones de empuje no se tienen en cuenta;

♦ El empuje pasivo movilizable: corresponde al límite plástico de la ley de interacción utilizada. Por ejemplo, con los parámetros de interacción suelo-estructura definidos en la norma NF P94-262 descrita anteriormente, el apoyo de los muelles es igual al diámetro del pilote multiplicado por la presión de fluencia, o la presión límite para acciones de muy corta duración de aplicación. Cuando se alcanza el límite, los resortes se plastifican hasta una cierta profundidad.

El cociente mide entonces este grado de plastificación, que tiene diferentes umbrales según las diferentes normas. Si se acerca a la unidad, el suelo está casi completamente plastificado.

El cociente de empuje pasivo movilizable/movilizado baja cuando, *ceteris paribus*, la carga aumenta, cuando la calidad del suelo es mala, cuando el suelo es granular o cuando la carga es de corta duración. Todo es lógico: el cociente es una medida de seguridad frente a la inestabilidad. Si el suelo es granular, la disminución de la ley de comportamiento se da para una profundidad de  $4\phi$  y no sólo  $2\phi$  como para el suelo coherente. Del mismo modo, una carga de corta duración tiene el doble de pendiente para el módulo lineal de movilización de la presión frontal que una carga de larga duración.

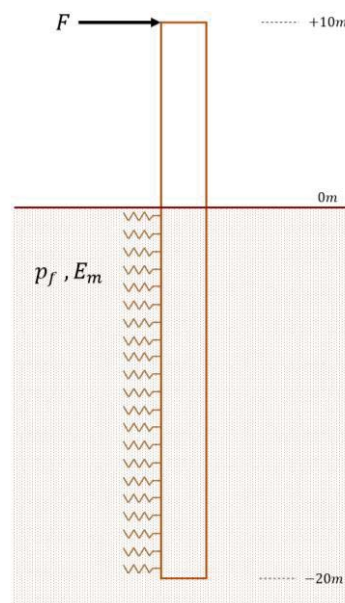
.

En definitiva, las profundidades de empotramiento  $x\phi$  para encontrar el  $M_{max}$ ,  $\delta = 0$  et  $\delta_{max}$  y cociente de empuje pasivo movilizable/movilizado serán los parámetros a tener en cuenta a la hora de comparar la precisión de los diferentes modelos.

## 4.2. Análisis de la influencia de la rigidez del suelo y del cociente de empuje pasivo

Para probar la herramienta de preprocesamiento y comprender el orden de magnitud de las diferencias de estos parámetros con el fin de diseñar rápidamente un pilote aislado durante las fases de licitación, se realizaron una serie de modelos sencillos.

En todos los casos, se utilizó un único pilote aislado de 2,2 m de diámetro y 44 mm de espesor, con una altura libre de 10 m y alcanzando una profundidad de 20 m



Como primer paso, se realizó un análisis para comprender la influencia de la rigidez del suelo y del cociente de empuje pasivo movilizable/movilizado (del modelo elastoplástico) en las tres profundidades  $\times \emptyset$  explicadas anteriormente (del modelo empotrado equivalente).

Durante el diseño, es necesario optimizar del cociente de empuje pasivo movilizable/movilizado. Por ello, es interesante realizar un análisis en el que se varíe la rigidez del suelo para intentar mantener un mismo cociente, por lo que la carga aplicada debe cambiar. En la práctica, el Eurocódigo7 y el ROSA2000 [22] limitan los cocientes según las condiciones de ataque, según ELS y ULS, en situaciones accidentales o de servicio. Así, se eligieron tres cocientes para el análisis: 1,10 (para ELUacc según EC7 sin ponderación), 1,50 (antiguo valor EC7 para ELUf provisional, ahora  $1,10 \times 1,35 = 1,49$ ) y 2,00 (antiguo valor EC7 para ELUf permanente, ahora  $1,4 \times 1,35 = 1,89$ ). La presión de fluencia varía entre 0,2-2 MPa y el módulo entre 4-40 MPa. El resto de las condiciones permanecen inalteradas: geometría constante, análisis a corto plazo y suelo considerado granular.

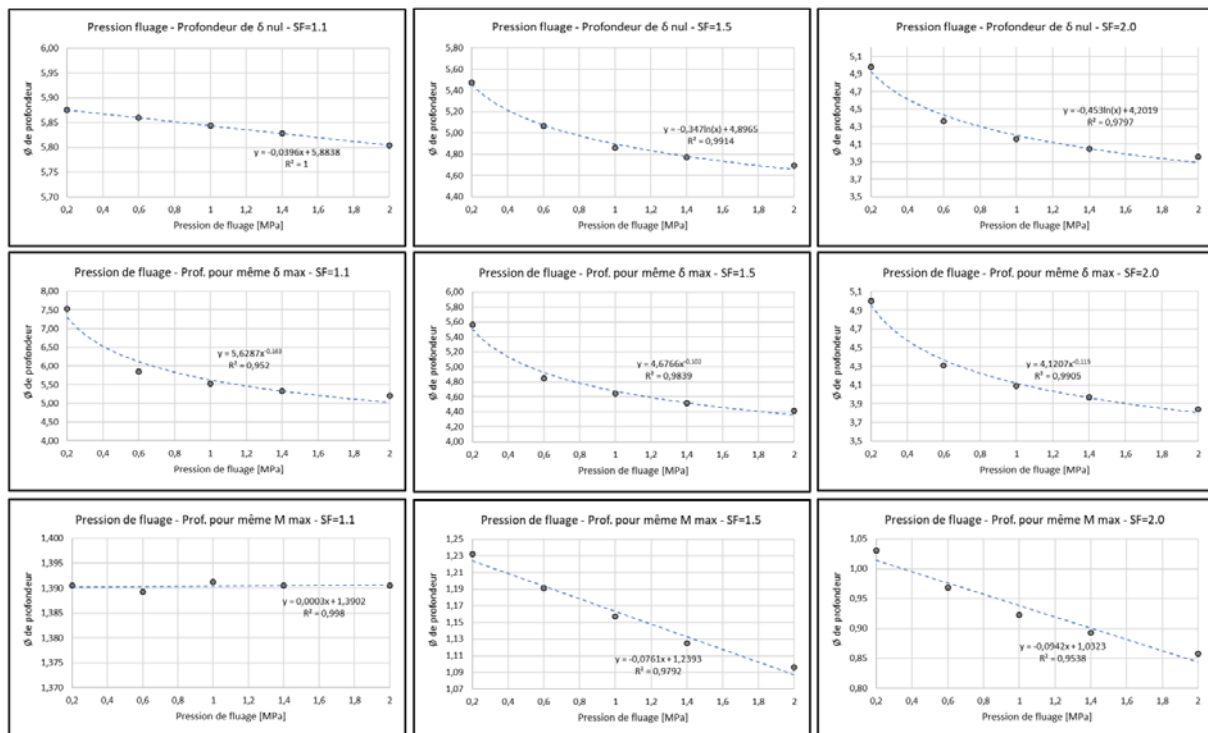


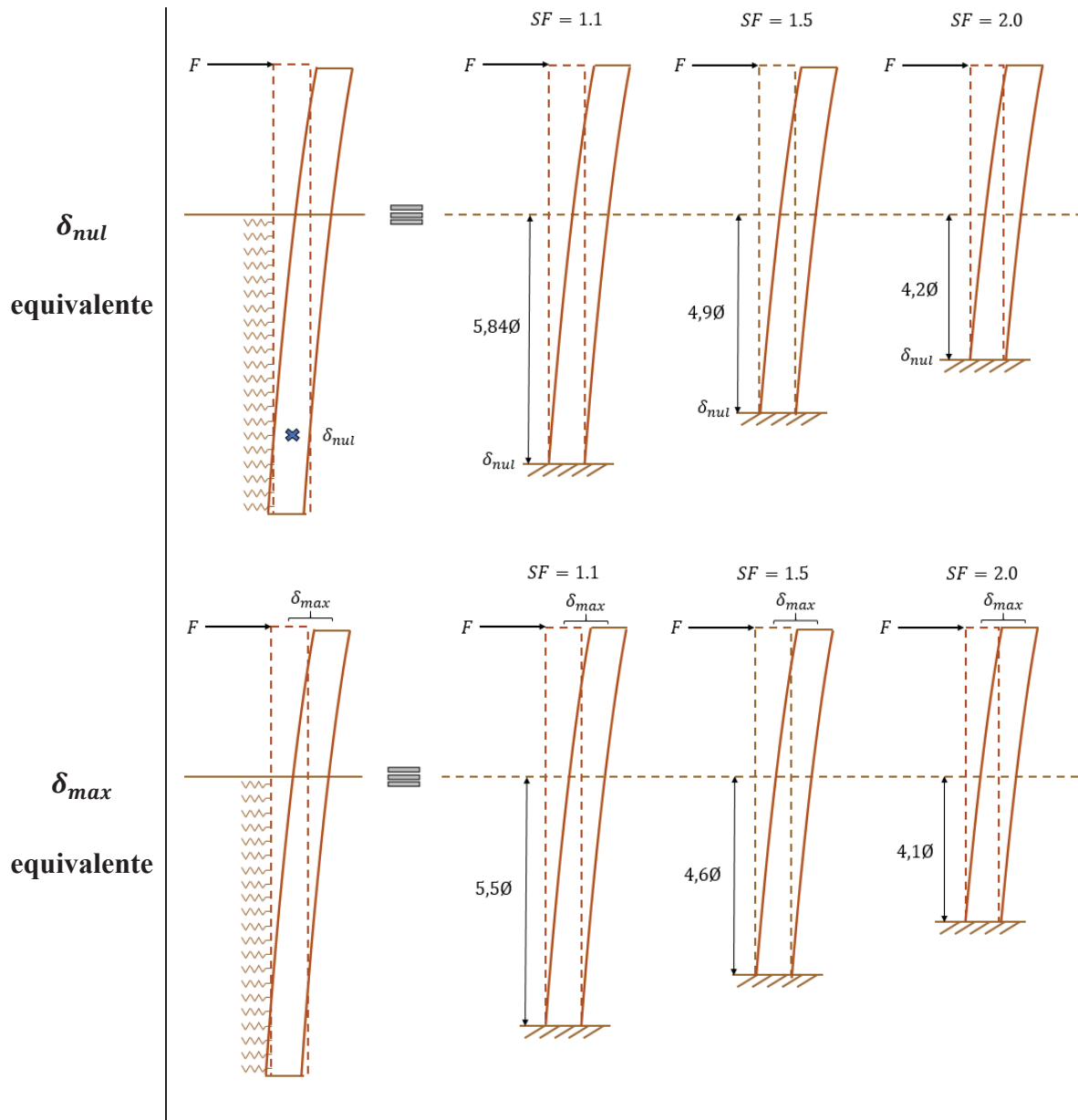
Figura 12 : Influencia de la rigidez y el cociente de empuje pasivo sobre las profundidades de empotramiento, desplazamiento y momento equivalente

Estas gráficas nos permiten 1) ver la influencia del cociente de empuje pasivo y 2) ver la influencia de la rigidez del suelo sobre las tres profundidades :

- Mayor rigidez implica menos profundidad de encastramiento, menos profundidad para alcanzar el mismo  $\delta_{max}$  y menos profundidad para alcanzar el mismo  $M_{max}$
- Mayor cociente de empuje pasivo movilizable/movilizado implica mayor influencia de la rigidez en el caso de las profundidades para alcanzar el mismo  $M_{max}$  y  $\delta=0$
- Mayor cociente de empuje pasivo movilizable/movilizado implica menos influencia de la rigidez en el caso de la profundidad para alcanzar el mismo  $\delta_{max}$

Ello es debido a que cuando el cociente de empuje pasivo movilizable/movilizado es próximo a la unidad, el suelo está plastificado sobre casi toda la longitud del pilote. Si la rigidez aumenta, la carga aplicada debe aumentar mucho más para mantener el mismo cociente de empuje pasivo movilizable/movilizado cuando es próximo de la unidad a cuando es superior.  $M_{max}$  aumenta en la misma proporción y visto que el brazo del momento permanece similar, el punto de empotramiento equivalente ( $\delta=0$ ) también. Este aumento del esfuerzo para el mismo punto de

empotramiento implica por tanto que  $\delta_{max}$  aumenta. En términos cuantitativos, se muestran las equivalencias entre el modelo elastoplástico y el modelo empotrado:



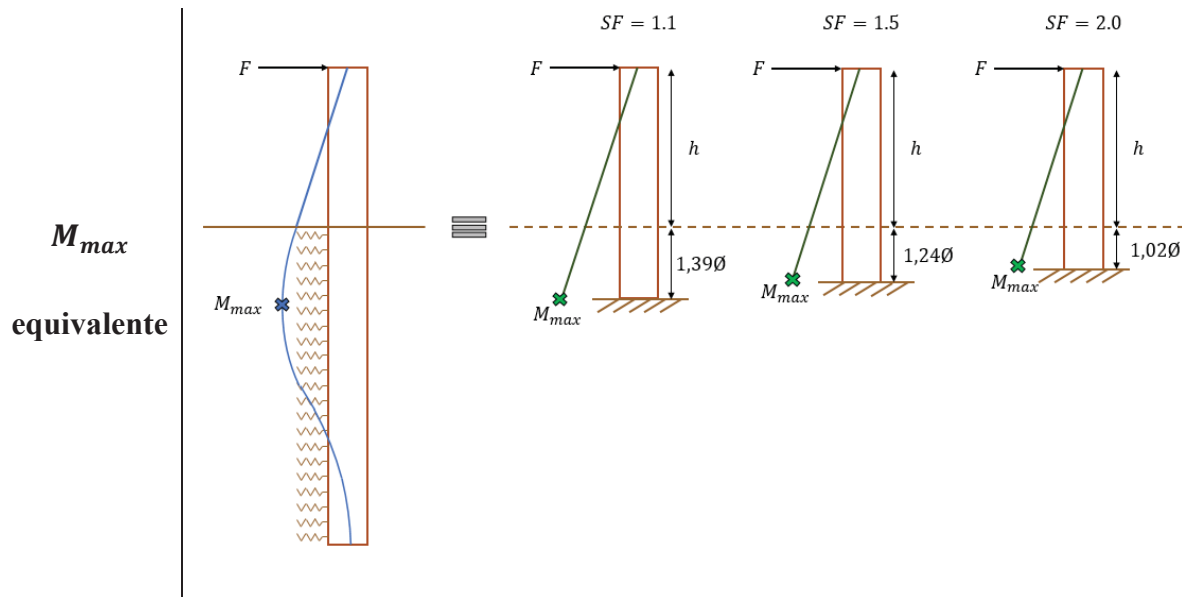


Tabla 2 : Diámetros de profundidad equivalentes entre un modelo elastoplástico y uno empotrado

- La profundidad para encontrar el mismo  $\delta$  nulo es de 5,84Ø, 4,9Ø y 4,2Ø de media para SF=1,1, SF=1,5 y SF=2,0 respectivamente
- La profundidad para encontrar el mismo  $\delta_{max}$  es de 5,5Ø, 4,6Ø y 4,1Ø de media para SF=1,1, SF=1,5 y SF=2,0 respectivamente.

Este parámetro está bastante relacionado con el anterior ya que se utiliza la fórmula de resistencia de materiales para encontrar el desplazamiento de la cabeza de una viga empotrada. Sin embargo, este parámetro es muy sensible en rigideces del suelo bajas, donde se pueden alcanzar profundidades como 7,5Ø, 5,6Ø y 5Ø.

- La profundidad para encontrar el mismo  $M_{max}$  es de 1,39Ø, 1,24Ø y 1,02Ø para SF=1,1, SF=1,5 y SF=2,0 respectivamente. Es el parámetro menos sensible a la rigidez.

Los resultados muestran claramente un valor medio: 3Ø, un compromiso entre el valor del momento flector y el desplazamiento de la cabeza. Este ha sido siempre un valor recomendado por los ingenieros geotécnicos en la práctica para realizar modelos simplificados con empotramiento. Sin embargo, este valor no estaba justificado adecuadamente. Las pruebas realizadas permiten ver cuál es el razonamiento de este valor y justificarlo empíricamente.

De hecho, estos resultados nos permiten tener un punto de partida que no está lejos de la solución final. Esto reduce el número de iteraciones y, por tanto, el tiempo de diseño, lo que es

fundamental en una empresa como VCMF, donde las licitaciones pueden durar menos de una semana. Estas pruebas también permiten elegir una profundidad en función del criterio a priorizar, estado límite último (momento de flexión) o utilidad (desplazamiento de la cabeza, especialmente relevante para el duque de Alba). Por último, estos resultados tranquilizan al equipo y a los clientes a la hora de tomar estas decisiones.

#### 4.3. Análisis de la influencia de la duración de la carga y del tipo de suelo

En el párrafo anterior, la modelización permitió analizar y comprender las profundidades de empotramiento equivalentes, el desplazamiento y el momento máximos entre un modelo empotrado y un modelo de suelo elastoplástico en función de su rigidez, para los tres cocientes de empuje pasivo normalmente utilizados.

A continuación, los modelos permiten analizar y comprender las cuestiones de la duración de la carga y la cohesividad del suelo. Así, la modelización anterior, realizada para un caso de carga de corta duración y suelo considerado como de granular, se repite ahora para 3 combinaciones más: carga de corta duración con suelo cohesivo, larga duración con suelo granular y larga duración con suelo cohesivo. Los resultados, presentados en el mismo formato y agrupados en el mismo gráfico, permiten ver claramente esta influencia:

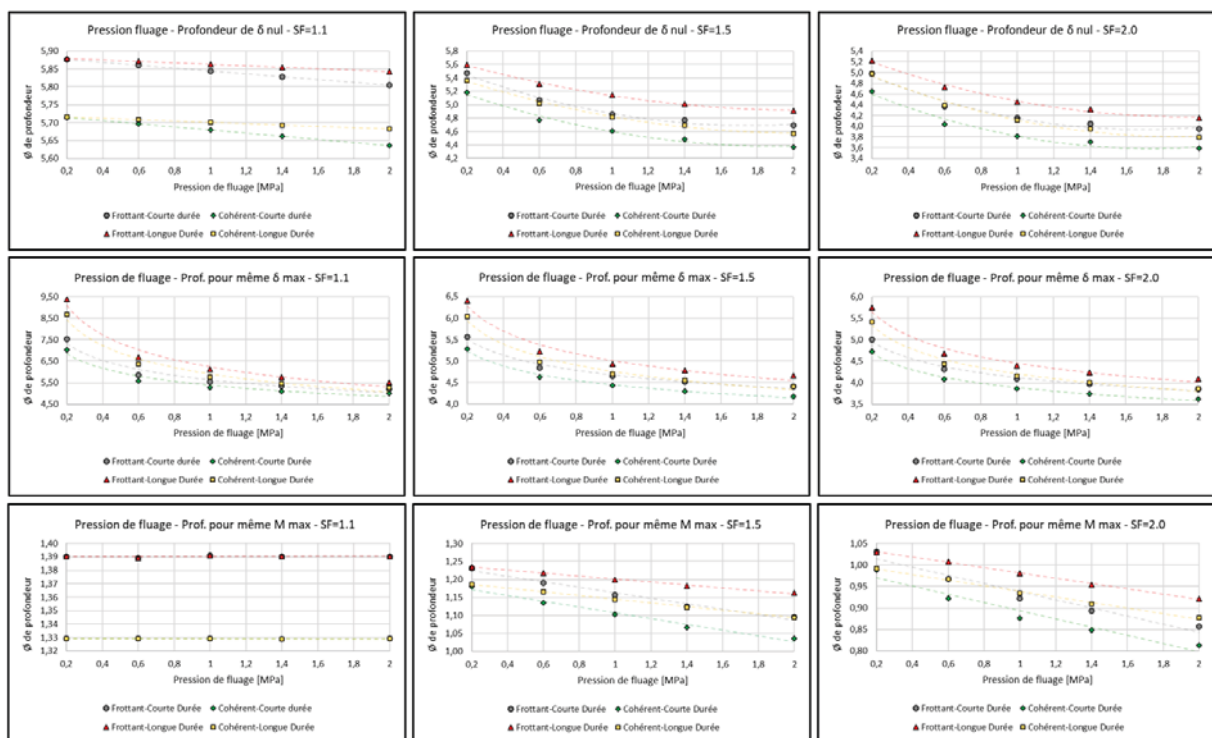


Figura 13 : Influencia del tipo de suelo y de la duración de la carga sobre las profundidades de empotramiento, desplazamiento y momento equivalente

Estas graficas nos permiten 1) afirmar y consolidar los resultados precedentes para un cociente específico de empuje pasivo movilizable/movilizado, 2) ver la influencia de la duración de la carga 3) ver la influencia del tipo de suelo. Las conclusiones son las siguientes:

- Las tendencias explicadas en el párrafo anterior se confirman para las 4 combinaciones.

- La duración corta o larga apenas cambia los resultados cuando se trata de un cociente próximo a la unidad para los casos de  $M_{max}$  y  $\delta=0$ . Esta influencia aumenta a medida que aumenta el cociente o la rigidez del suelo.

Esto se debe a que, para un cociente cercano a la unidad, el suelo se plastifica casi por completo y, por tanto, independientemente de la rigidez del muelle, está relacionado con la duración de la carga. Sólo influirá en el resultado el valor del límite plástico, proporcional a la presión de fluencia ( $r_1 = \phi p_f$ )

- El carácter del suelo, cohesivo o granular, es decisivo cuando se trata de cociente de empuje pasivo pequeño para los casos de  $M_{max}$  et  $\delta=0$ . Esto es aún más importante cuando el diámetro del pilote es mayor, ya que el efecto de reducción del límite plástico afectará a la profundidad de  $2\phi$  o  $4\phi$ . Por lo tanto, para un cociente de empuje cercano a la unidad, los resultados no cambian casi nada con la rigidez, pero esta diferencia se hace más pronunciada a medida que aumenta el cociente de empuje.
- Contrariamente, para  $\delta_{max}$  los resultados convergen con rigideces grandes y cocientes de empuje pasivo altos (no hay tanta plasticidad).
- No es lógico comparar qué influye más, si la duración de la carga o el tipo de suelo, ya que éste incidirá más cuando el diámetro del pilote sea mayor.

Sin embargo, se constata que, siempre, los diámetros de profundidad son mayores cuando se trata de un suelo granular ( $4\phi$ ) y no cohesivo ( $2\phi$ ), o cuando se trata de una carga de larga duración y no de corta.

Por un lado, esto se debe a que cuando el suelo pasa de granular a cohesivo, el cociente de empuje pasivo se hace mayor para la misma carga, ya que el pasivo movilizable aumenta. A continuación se muestra un diagrama de la situación.

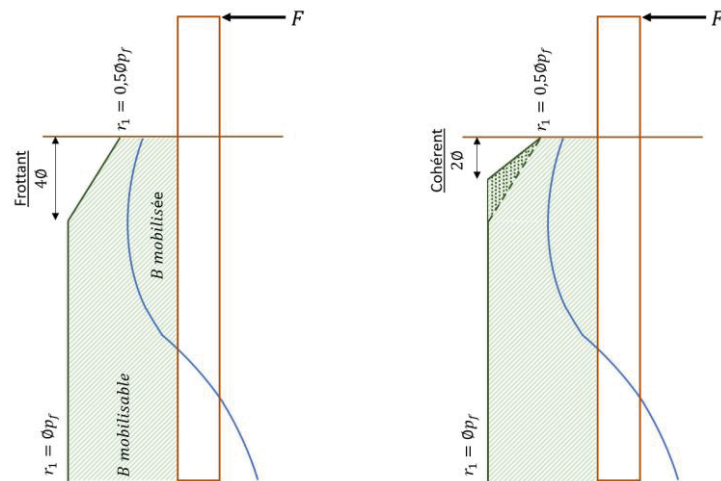


Figura 14 : Diferencia entre los empujes pasivos movilizables de un suelo cohesivo y uno granular

Sin embargo, como el tipo de análisis realizado fija el cociente de empuje pasivo cambiando el valor de la carga, esta debe aumentar para reducir el cociente. Cuando la carga aumenta, el momento también, y por tanto las profundidades  $xØ$  de  $M_{max}$ ,  $\delta_{max}$  et  $\delta=0$ .

Por otro lado, cuando la duración de aplicación de la carga pasa de corta a larga, el cociente de empuje pasivo disminuye para una misma carga porque el empuje pasivo movilizado aumenta y la consecuencia se repite: las profundidades  $xØ$  aumentan.

La conclusión para la duración de la carga puede ser poco intuitiva, pero ella está condicionada por las limitaciones del análisis. El hecho de fijar el cociente de empuje implica deber variar otro parámetro. Se decidió que dicho parámetro fuese la fuerza aplicada y no la profundidad porque este procedimiento llevaría mucho más tiempo (iterar con el cambio de valor de una fuerza es mucho más simple que rehacer todo el modelo con otros resortes). Ello permite una comparación relativamente adecuada que pone el acento sobre el análisis y comprender los comportamientos, preferible a sobre cómo crear el modelo.

En términos cuantitativos...

- La profundidad para obtener el mismo  $\delta$  nulo puede diferir:
  - o Desde  $0.15Ø$  para SF1.1 hasta  $0.6Ø$  para SF2.0 entre granular y cohesivo
  - o Desde  $0.04Ø$  para SF1.1 hasta  $0.2Ø$  para SF2.0 entre larga y corta duración
- La profundidad para obtener el mismo  $\delta_{max}$  puede diferir:

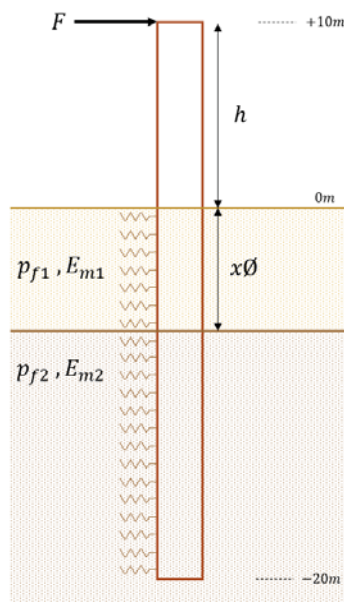
- o Desde  $0.6\phi$  para SF1.1 hasta  $0.3\phi$  para SF2.0 entre granular y cohesivo
  - o Desde  $2\phi$  para SF1.1 hasta  $0.7\phi$  para SF2.0 entre larga y corta duración
- La profundidad para encontrar el mismo  $M_{max}$  puede diferir:
  - o Un  $0.06\phi$  entre frottant et cohérent
  - o Desde  $0\phi$  para SF1.1 hasta  $0.07\phi$  para SF2.0 entre larga y corta duración

Es necesario remarcar que, a pesar de haber escogido un diámetro realista para el duque de alba, toda variación tendrá un impacto directo sobre los parámetros de la ley de interacción, (módulo  $K_f$  y límite  $r_1$ ). En consecuencia, los valores cuantitativos no serán exactamente iguales y un valor conservativo es aconsejado.

#### 4.4. Análisis de la presencia de una capa de suelo superficial de pobre calidad

Los modelos realizados hasta ahora consideraban un suelo uniforme. Sin embargo, se trata de una situación poco frecuente en la realidad. Normalmente, las características resistentes del suelo mejoran con la profundidad y son muy variables en la superficie. En el ámbito marítimo y fluvial, es muy común encontrar una capa superficial de lodo, arena poco consolidada de baja resistencia, resultante del transporte sedimentario.

Para analizar la influencia de esta capa en modelos simplificados de pilotes aislados, se elige esta nueva configuración:



La presión de fluencia del limo será constante e igual a 0.1 MPa ( $E_{m1} = 2$  MPa) mientras que la del suelo inferior variará entre 0.2-2 MPa ( $E_{m2} = 4 - 40$  MPa), a fin de ser comparable a los resultados del primer ejercicio, para una carga de corta duración y un suelo granular.

Se aumentará el grosor del limo, por intervalos de  $0,5\varnothing$ , para comprender qué influencia tiene en los resultados, y cuándo puede despreciarse (recordemos que  $\varnothing=2,2$ m). La fuerza cambiará, por lo tanto, para mantener el cociente de empuje pasivo movilizable/movilizado en 1,1, 1,5 y 2.

Los resultados se presentan en las figuras siguientes, con una comparación que incluye en la leyenda los diferentes espesores de la capa de limo para cada cociente de empuje pasivo:

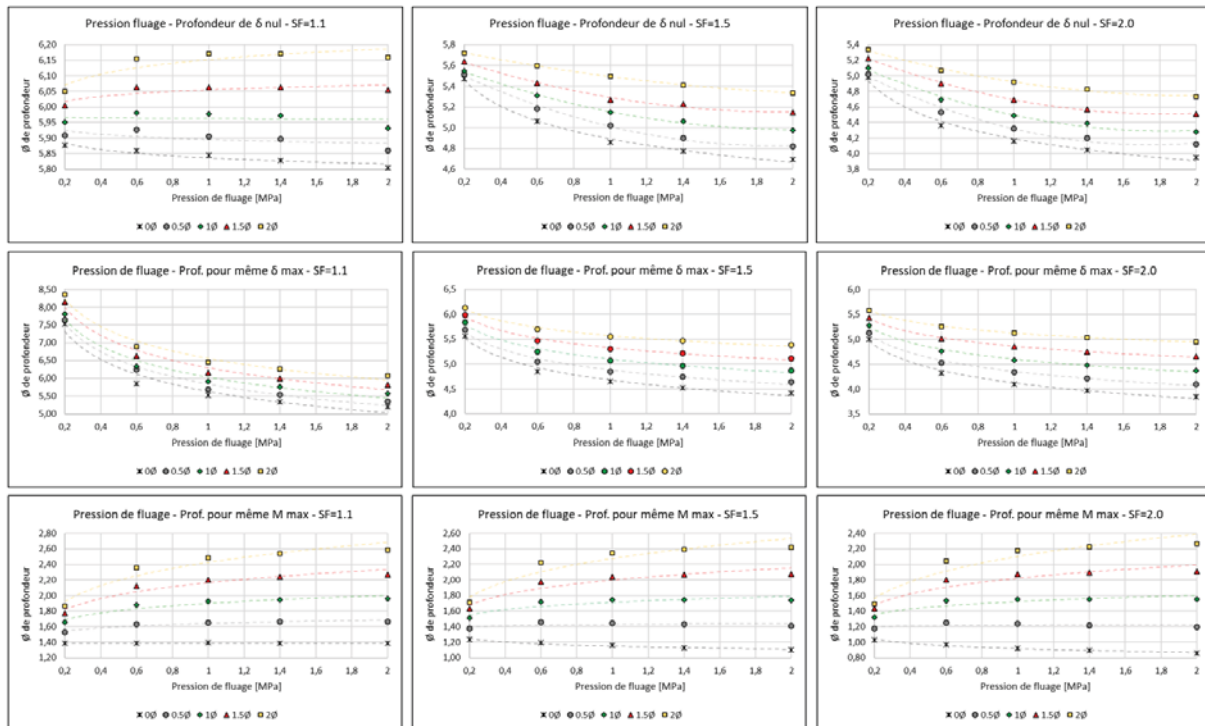


Figura 15 : Influencia del espesor de la capa de limo sobre las profundidades de empotramiento, desplazamiento y momento equivalente

Las conclusiones extraídas son las siguientes:

- Las profundidades aumentan con el espesor de la capa de limo.
- Este aumento es proporcional a la rigidez de la capa inferior y al cociente de empuje pasivo, con una asíntota para las rigideces más importantes:

o Para  $\delta = 0$ , incrementos de entre  $0.07\delta$ - $0.17\delta$  para cada  $0.5\delta$  de espesor.

Para  $\delta = 0$ , disminuciones de entre  $0$ - $0.2\delta$  para cada  $0.2\text{MPa}$  de rigidez.

o Para  $\delta_{max}$ , incrementos de entre  $0.15\delta$ - $0.27\delta$  para cada  $0.5\delta$  de espesor.

Para  $\delta_{max}$ , disminuciones de entre  $0.13\delta$ - $0.24\delta$  para cada  $0.2\text{MPa}$  de rigidez.

$\delta_{max}$  es verdaderamente variable cuando la rigidez y el cociente de empuje son pequeños.

o Para  $M_{max}$ , incrementos de entre  $0.15\delta$ - $0.35\delta$  para cada  $0.5\delta$  de espesor.

Para  $M_{max}$ , incrementos de entre  $0.07\delta$ - $0.35\delta$  para cada  $0.2\text{MPa}$  de rigidez.

Una forma simplificada de expresar estos resultados es añadir entre 1/3 y 2/3 del espesor de la capa de limo a los resultados de profundidad para encontrar  $M_{max}$ . Físicamente ello implica ignorar una parte del espesor de la capa de limo.

#### 4.5. Matriz de rigidez para un pilote aislado

El objetivo de este ejercicio es analizar la precisión de los resultados de un modelo que utiliza una matriz de rigidez para sustituir todos los resortes del modelo elastoplástico. Esta técnica se utilizaba antiguamente para mejorar los tiempos de cálculo obteniendo resultados similares. Este ejercicio, realizado en un solo pilote aislado, permitirá extender su uso a muelles sobre pilotes más complejos.

Los modelos de pilotes empotrados del primer párrafo se utilizarán de nuevo, para comparar los resultados de los modelos de matriz de rigidez.

En primer lugar, se realiza un modelo de un pilote empotrado a una determinada profundidad del suelo  $x_0$  y se le aplica una combinación de cargas. El cálculo, que se resuelve de forma lineal rápidamente, da las reacciones del empotramiento.

A continuación, la reacción hallada anteriormente se aplica a la profundidad  $x_0$  de un pilote que se modelará con muelles elastoplásticos. Después de un cálculo no lineal se encuentra su desplazamiento y rotación en el punto  $x_0$ . Esto permite obtener una matriz de rigidez, que se supone igual para las direcciones del plano ortogonal al pilote (el desplazamiento vertical está bloqueado y la rotación alrededor del eje es libre).

$$[F] = [K] * [X] \rightarrow [K] = [F] * [X]^{-1} \rightarrow \begin{bmatrix} k_{\delta\delta} & 0 \\ 0 & k_{\theta\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1/\delta & 0 \\ 0 & 1/\theta \end{bmatrix}$$

$$k_{\delta\delta} = V/\delta; k_{\theta\theta} = M/\theta$$

Finalmente, si esta matriz de rigidez se impone a un último modelo del pilote y se resuelve con un cálculo lineal, se obtendrán resultados similares al modelo elastoplástico completo. Esta matriz de rigidez es válida para cualquier nueva combinación de carga aplicada al modelo, lo que ahorra mucho tiempo de cálculo,

El presente ejercicio se realiza para probar la validez de dos casos diferentes:

- Una matriz de rigidez calculada con el  $x\emptyset$  que da el mismo  $M_{max}$  que el modelo elastoplástico.
- Una matriz de rigidez calculada con el  $x\emptyset$  que da el mismo  $\delta_{max}$  que el modelo elastopl.

Se realiza para un cociente de empuje pasivo movilizable/movilizado igual a 2 y diferentes rigideces, de forma similar al ejercicio anterior, para un suelo granular y a corto plazo. Los resultados son los siguientes:

| Comparaison Modèles en Sable SF=2 - Même M max |                           |              |              |
|------------------------------------------------|---------------------------|--------------|--------------|
| Pression fluage [Mpa]                          |                           | 0,2          | 2            |
| Charge appliquée [kN]                          |                           | 1163         | 9450         |
| Pied pieu encastré $x\emptyset$                |                           | <b>1,03</b>  | <b>0,86</b>  |
| M max sol<br>[kN.m]                            | Modèle EP complet         | 14267        | 112326       |
|                                                | Modèle encastré           | 14267        | 112326       |
|                                                | % erreur                  | <b>0,0%</b>  | <b>0,0%</b>  |
|                                                | Modèle matrice de raideur | 14267        | 112326       |
|                                                | % erreur                  | <b>0,0%</b>  | <b>0,0%</b>  |
| $\delta$ max<br>[m]                            | Modèle EP complet         | -0,0959      | -0,5280      |
|                                                | Modèle encastré           | -0,0209      | -0,1547      |
|                                                | % erreur                  | <b>78,2%</b> | <b>70,7%</b> |
|                                                | Modèle matrice de raideur | -0,0959      | -0,5287      |
|                                                | % erreur                  | <b>0,1%</b>  | <b>0,1%</b>  |

| Comparaison Modèles en Sable SF=2 - Même $\delta$ max |                           |              |              |
|-------------------------------------------------------|---------------------------|--------------|--------------|
| Pression fluage [Mpa]                                 |                           | 0,2          | 2            |
| Charge appliquée [kN]                                 |                           | 1163         | 9450         |
| Pied pieu encastré $x\emptyset$                       |                           | <b>5,00</b>  | <b>3,84</b>  |
| M max sol<br>[kN.m]                                   | Modèle EP complet         | 14267        | 112326       |
|                                                       | Modèle encastré           | 24434        | 174393       |
|                                                       | % erreur                  | <b>71,3%</b> | <b>55,3%</b> |
|                                                       | Modèle matrice de raideur | 14267        | 112326       |
|                                                       | % erreur                  | <b>0,0%</b>  | <b>0,0%</b>  |
| $\delta$ max<br>[m]                                   | Modèle EP complet         | -0,0959      | -0,5280      |
|                                                       | Modèle encastré           | -0,1008      | -0,5587      |
|                                                       | % erreur                  | <b>5,2%</b>  | <b>5,8%</b>  |
|                                                       | Modèle matrice de raideur | -0,0574      | -0,2032      |
|                                                       | % erreur                  | <b>40,1%</b> | <b>61,5%</b> |

Tabla 3 : Comparación de errores de un pilote aislado modelizado con un empotramiento o una matriz de rigidez contra una modelización elastoplástica no lineal

Estos resultados conducen a una conclusión interesante:

- El modelo empotrado a la profundidad  $x_0$  que proporciona el mismo  $M_{max}$  que el modelo elastoplástico, permite encontrar una matriz de rigidez que proporcionará los resultados adecuados de  $M_{max}$  y  $\delta_{max}$
- Sin embargo, el modelo empotrado a la profundidad  $x_0$  que proporciona el mismo  $\delta_{max}$  que el modelo elastoplástico, permite encontrar una matriz de rigidez que proporcionará únicamente resultados similares de  $M_{max}$

Es decir, cuando el modelo simplificado deseado es un pilote empotrado a una profundidad  $x_0$ , habrá que diseñar dos, uno que reproduzca  $M_{max}$  y otro que reproduzca  $\delta_{max}$ .

Mientras que cuando el modelo simplificado deseado es un pilote al que se le impone una matriz de rigidez basta con utilizar sólo el modelo empotrado que simula  $M_{max}$  para tener resultados casi perfectos tanto en momentos como desplazamientos y, por tanto, el preferido.

El potencial de los modelos de matriz de rigidez no se explota con un pilote aislado, pero estos resultados permiten comprender y mejorar su uso para un tema más complejo como es el muelle sobre pilotes. Esto se tratará en el próximo capítulo, donde se explicará con más detalle el procedimiento de diseño de los modelos de matriz de rigidez.

## 5. Comparación de modelos simplificados para muelles de pilotes

---

Los diques o muelles de pilotes son estructuras muy comunes en las obras marítimas por su sencillez constructiva, economía de materiales y ventajas en zonas sísmicas.

Este capítulo, en línea con el anterior, está dedicado al análisis y la validación de modelos de diferente complejidad. Una vez más, para su cálculo más preciso, se requiere un modelo de elementos finitos con resortes elastoplásticos para la interacción del suelo con cada pilote según la NF P94-262. El número de pilotes y las combinaciones de carga determinarán el tiempo de cálculo, que puede ser importante en la fase de licitación. Los modelos simplificados considerados son los compuestos por pilotes empotrados en su base y por pilotes a los que se les impone una matriz de rigidez. En primer lugar, se detalla la creación de estos dos tipos de modelos para un muelle.

### 5.1. Tipos de modelos simplificados analizados

El primer modelo, el más sencillo, consiste en empotrar los pilotes a una determinada profundidad del suelo  $x_0$  y aplicarle una combinación de cargas. El cálculo, que se resuelve de forma lineal rápidamente, permite obtener las reacciones de empotramiento, de las cuales se elige la más restrictiva.

El segundo modelo, más complejo y preciso, utiliza la noción de matriz de rigidez. La reacción encontrada anteriormente se aplica a la profundidad  $x_0$  de un solo pilote que se modelará de forma aislada con muelles elastoplásticos. Después de un cálculo no lineal se encuentra su desplazamiento y rotación en el punto  $x_0$ . Esto permite obtener una matriz de rigidez, que se supone igual para las tres direcciones de desplazamiento y rotación. Al imponer esta matriz de rigidez para todos los pilotes del modelo y no un empotramiento, se obtienen resultados similares al modelo elastoplástico completo. Esta matriz de rigidez es válida para cualquier nueva combinación de carga aplicada al modelo y por tanto se ahorra tiempo de cálculo en las siguientes etapas.

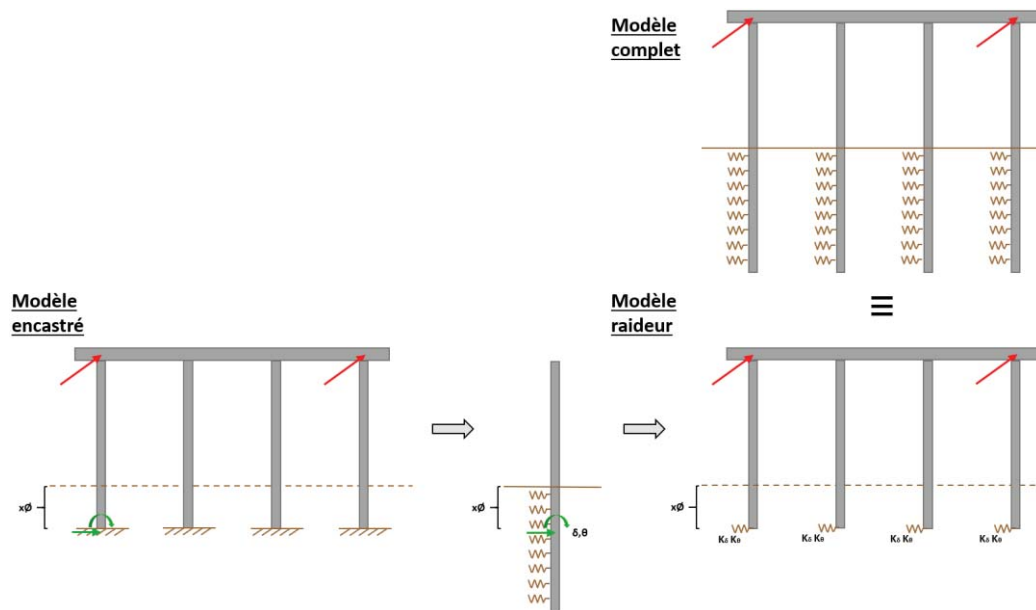


Figura 162: Tres posibles modelizaciones de un muelle sobre pilotes

Para probar la herramienta de preprocesamiento y comprender la magnitud de estas desviaciones a la hora de diseñar un QSP rápidamente en la fase de licitación, se realizaron una serie de modelos sencillos de un pequeño muelle.

La geometría del muelle está definida por filas de pilotes de 4x3. Es suficiente para tener una visión general de los problemas, analizar los resultados con claridad y ahorrar tiempo de cálculo. Los pilotes están separados 4 m en sentido transversal y 5 m en sentido longitudinal, con partes en voladizo de 1 m en cada extremo. Los pilotes tienen un diámetro de 1,2 m y un grosor de 22 mm, una profundidad de 20 m y una altura libre de 10 m

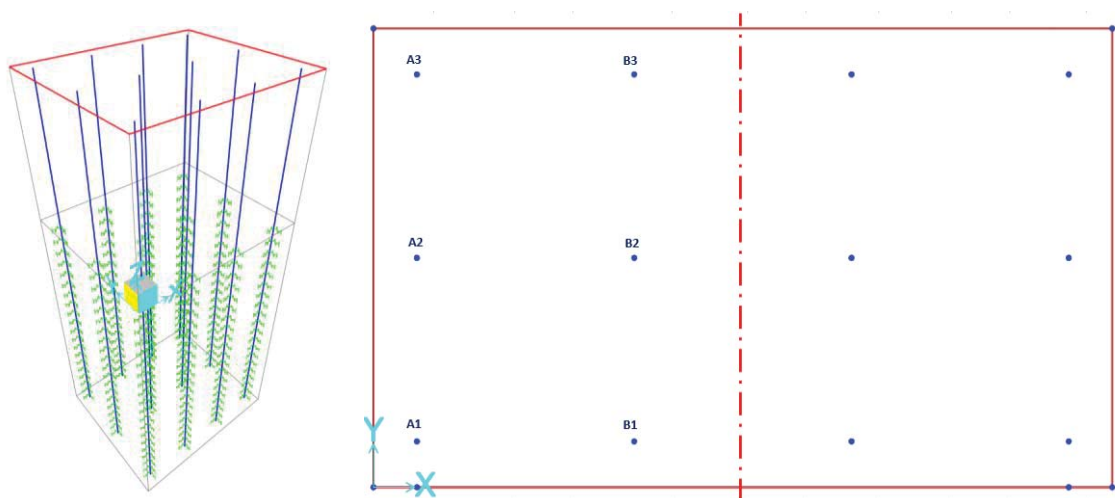
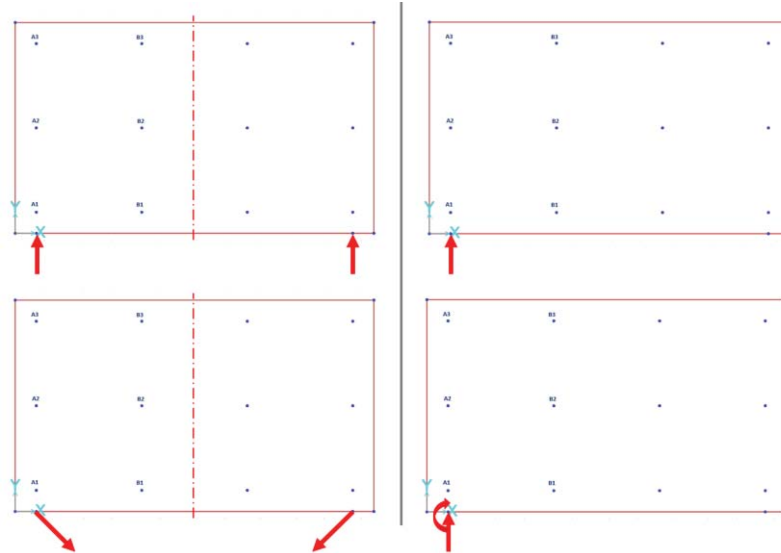


Figura 17 : Geometría del muelle modelizado – modelo elastoplástico

Solicitaciones simétricas o no, fuerzas y momentos en diferentes direcciones, han sido aplicados a fin de evaluar los comportamientos de la estructura y no encontrar una modelización que verificase únicamente una cierta condición:



*Figura 18 : Combinaciones de cargas analizadas*

Los valores de carga se iteraron varias veces para ajustar el momento de los pilotes a su límite admisible y tener un bajo cociente de empuje pasivo movilizable/movilizado. Sin embargo, para este tipo de estructuras, las cargas horizontales no siempre son las dominantes. El peso vertical tomado por los pilotes puede ser muy alto debido a la existencia de losas, grúas, contenedores, etc.

En los siguientes párrafos se repite el procedimiento seguido para el análisis en el caso de un pilote aislado visto en el capítulo 4, con ligeras modificaciones.

## 5.2. Análisis de la influencia de la rigidez del suelo para modelos de empotramientos y matrices de rigidez

En primer lugar, para la modelización realizada con suelo uniforme, se ensayaron tres rigideces diferentes (presiones de fluencia de 0,2 MPa, 0,7 MPa y 1 MPa) con las mismas combinaciones y valores de carga. A diferencia del estudio de pilotes individuales, el cociente de empuje pasivo cambia ya que el valor de la carga es fijo, pero este cociente se mantiene en los niveles restrictivos de las normas.

La cuestión más importante es qué profundidad  $x_0$  debe utilizarse para el modelo de empotramiento y para elaborar la matriz de rigidez, con el fin de obtener los resultados más similares al modelo elastoplástico.

Hay que elegir cuál es el parámetro más importante que hay que modelar. En el caso de un muelle de pilotes, el momento máximo es más importante que el desplazamiento, el cual es una limitación más importante para un pilote aislado.

Un buen punto de partida es la profundidad  $x_0$  para tener el mismo  $M_{max}$  en el caso de un pilote aislado, visto en el capítulo 4. Dado que el valor del empotramiento del modelo está relacionado con el valor del cociente de empuje pasivo y éste es normalmente más variable que en el caso de un pilote aislado, es probable que los resultados sean más divergentes cuando la carga es muy diferente.

La comparación de los resultados se muestra a continuación. Se analizan todos los casos de carga y se indica el pilote más solicitado. El porcentaje de error al comparar los modelos de empotramiento o de matriz de rigidez con el modelo elastoplástico completo muestra su idoneidad para un determinado aspecto.

| Comparaison Modèles en Sable $P_f=0,2$ MPa; $E_m=4$ MPa |                    |                    |                    |                     |                         |                         |
|---------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| Cas charge                                              | Accost sym 1000 kN | Accost sym 4000 kN | Accost sym 5500 kN | Accost Asym 5500 kN | Accost+Mom Asym 5500 kN | Amarr Sym Incln 5000 kN |
| Pieu critique                                           | B2                 | B2                 | B2                 | A2                  | A2                      | A1                      |
| Pied pieu                                               | $\phi=1,2m$        | $\phi=1,2m$        | $\phi=1,2m$        | $\phi=1,2m$         | $\phi=1,2m$             | $\phi=1,2m$             |
| SF butée pieu critique                                  | 9,5                | 2,3                | 1,73               | 1,68                | 1,67                    | 1,89                    |
| Modèle EP complet                                       | -991               | -4224              | -5892              | -6076               | -6102                   | 5171                    |
| Modèle encastré                                         | -1355              | -5421              | -7453              | -8718               | -8827                   | 7177                    |
| % erreur                                                | 36,7%              | 28,3%              | 26,5%              | 43,5%               | 44,7%                   | 38,8%                   |
| Modèle matrice de raideur                               | -1051              | -4203              | -5779              | -6793               | -6843                   | 5189                    |
| % erreur                                                | 6,1%               | 0,5%               | 1,9%               | 11,8%               | 12,2%                   | 0,3%                    |
| Modèle EP complet                                       | 1991               | 8852               | 12768              | 13247               | 13357                   | 11962                   |
| Modèle encastré                                         | 2051               | 8206               | 11283              | 13030               | 13238                   | 12007                   |
| % erreur                                                | 3,0%               | 7,3%               | 11,6%              | 1,6%                | 0,9%                    | 0,4%                    |
| Modèle matrice de raideur                               | 2054               | 8215               | 11295              | 13044               | 13190                   | 10984                   |
| % erreur                                                | 3,1%               | 7,2%               | 11,5%              | 1,5%                | 1,3%                    | 8,2%                    |
| Modèle EP complet                                       | 0,0329             | 0,1829             | 0,3014             | 0,3159              | 0,3179                  | -0,2451                 |
| Modèle encastré                                         | 0,0148             | 0,0593             | 0,0815             | 0,0964              | 0,0973                  | -0,0708                 |
| % erreur                                                | 55,0%              | 67,6%              | 73,0%              | 69,5%               | 69,4%                   | 71,1%                   |
| Modèle matrice de raideur                               | 0,0328             | 0,1310             | 0,1802             | 0,2128              | 0,2141                  | -0,1584                 |
| % erreur                                                | 0,5%               | 28,3%              | 40,2%              | 32,7%               | 32,6%                   | 35,4%                   |

|                      | Comparaison Modèles en Sable $P_r=0.7$ MPa; $E_m=13$ MPa |                    |                    |                    |                     |                         |                         |
|----------------------|----------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
|                      | Cas charge                                               | Accost sym 1000 kN | Accost sym 4000 kN | Accost sym 5500 kN | Accost Asym 5500 kN | Accost+Mom Asym 5500 kN | Amarr Sym Incln 5000 kN |
|                      | Pieu critique                                            | B2                 | B2                 | B2                 | A2                  | A2                      | A1                      |
|                      | Pied pieu                                                | 0,5 $\phi$ =0,6m   | 0,5 $\phi$ =0,6m   | 0,5 $\phi$ =0,6m   | 0,5 $\phi$ =0,6m    | 0,5 $\phi$ =0,6m        | 0,5 $\phi$ =0,6m        |
|                      | SF butée pieu critique                                   | 27,3               | 6,8                | 5,1                | 4,4                 | 4,4                     | 5,7                     |
| M max sol<br>[kN.m]  | Modèle EP complet                                        | -1026              | -4198              | -5734              | -6377               | -6423                   | 5124                    |
|                      | Modèle encastré                                          | -1292              | -5168              | -7107              | -8319               | -8430                   | 6899                    |
|                      | % erreur                                                 | 25,9%              | 23,1%              | 23,9%              | 30,5%               | 31,3%                   | 34,6%                   |
|                      | Modèle matrice de raideur                                | -1042              | -4168              | -5732              | -6734               | -6791                   | 5189                    |
|                      | % erreur                                                 | 1,5%               | 0,7%               | 0,0%               | 5,6%                | 5,7%                    | 1,3%                    |
| $\Delta M$<br>[kN.m] | Modèle EP complet                                        | 1926               | 7878               | 10977              | 12283               | 12420                   | -11030                  |
|                      | Modèle encastré                                          | 1938               | 7753               | 10660              | 12320               | 12530                   | -11563                  |
|                      | % erreur                                                 | 0,6%               | 1,6%               | 2,9%               | 0,3%                | 0,9%                    | 4,8%                    |
|                      | Modèle matrice de raideur                                | 1945               | 7781               | 10702              | 12353               | 12508                   | -10653                  |
|                      | % erreur                                                 | 1,0%               | 1,2%               | 2,5%               | 0,6%                | 0,7%                    | 3,4%                    |
| $\delta$ max<br>[m]  | Modèle EP complet                                        | 0,0261             | 0,1100             | 0,1634             | 0,1870              | 0,1884                  | -0,1368                 |
|                      | Modèle encastré                                          | 0,0128             | 0,0513             | 0,0705             | 0,0835              | 0,0843                  | -0,0611                 |
|                      | % erreur                                                 | 50,8%              | 53,4%              | 56,8%              | 55,3%               | 55,2%                   | 55,3%                   |
|                      | Modèle matrice de raideur                                | 0,0257             | 0,1028             | 0,1414             | 0,1670              | 0,1682                  | -0,1238                 |
|                      | % erreur                                                 | 1,5%               | 6,5%               | 13,5%              | 10,7%               | 10,7%                   | 9,5%                    |

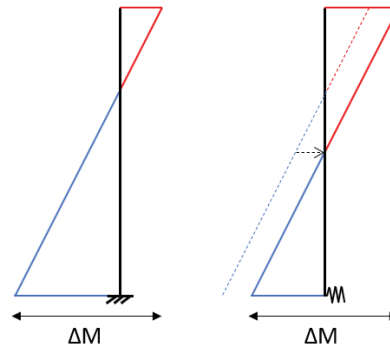
|                        |                           | Comparaison Modèles en Sable $P_r=1,0$ MPa; $E_m=20$ MPa |                    |                    |                     |                         |                         |
|------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| Cas charge             |                           | Accost sym 1000 kN                                       | Accost sym 4000 kN | Accost sym 5500 kN | Accost Asym 5500 kN | Accost+Mom Asym 5500 kN | Amarr Sym Incln 5000 kN |
| Pieu critique          |                           | B2                                                       | B2                 | B2                 | A2                  | A2                      | A1                      |
| Pied pieu              |                           | 0,5 $\phi$ =0,6m                                         | 0,5 $\phi$ =0,6m   | 0,5 $\phi$ =0,6m   | 0,5 $\phi$ =0,6m    | 0,5 $\phi$ =0,6m        | 0,5 $\phi$ =0,6m        |
| SF butée pieu critique |                           | 36,8                                                     | 9,09               | 6,53               | 5,8                 | 5,75                    | 7                       |
| M max sol<br>[kN.m]    | Modèle EP complet         | -1048                                                    | -4174              | -5824              | -6566               | -6614                   | 5236                    |
|                        | Modèle encastré           | -1292                                                    | -5168              | -7106              | -7979               | -8085                   | 6985                    |
|                        | % erreur                  | 23,3%                                                    | 23,8%              | 22,0%              | 21,5%               | 22,3%                   | 33,4%                   |
|                        | Modèle matrice de raideur | -1070                                                    | -4281              | -5887              | -7046               | -7109                   | 5359                    |
|                        | % erreur                  | 2,2%                                                     | 2,6%               | 1,1%               | 7,3%                | 7,5%                    | 2,4%                    |
| $\Delta M$<br>[kN.m]   | Modèle EP complet         | 1917                                                     | 7694               | 10785              | 12239               | 12379                   | 10983                   |
|                        | Modèle encastré           | 1938                                                     | 7753               | 10660              | 11816               | 12019                   | 11557                   |
|                        | % erreur                  | 1,1%                                                     | 0,8%               | 1,2%               | 3,5%                | 2,9%                    | 5,2%                    |
|                        | Modèle matrice de raideur | 1946                                                     | 7786               | 10705              | 12590               | 12752                   | 10740                   |
|                        | % erreur                  | 1,5%                                                     | 1,2%               | 0,7%               | 2,9%                | 3,0%                    | 2,2%                    |
| $\delta$ max<br>[m]    | Modèle EP complet         | 0,0243                                                   | 0,0999             | 0,1451             | 0,1682              | 0,1694                  | -0,1214                 |
|                        | Modèle encastré           | 0,0128                                                   | 0,0513             | 0,0705             | 0,0801              | 0,0809                  | -0,0611                 |
|                        | % erreur                  | 47,2%                                                    | 48,7%              | 51,4%              | 52,4%               | 52,3%                   | 49,7%                   |
|                        | Modèle matrice de raideur | 0,0239                                                   | 0,0955             | 0,1313             | 0,1582              | 0,1594                  | -0,1148                 |
|                        | % erreur                  | 1,6%                                                     | 4,4%               | 9,5%               | 5,9%                | 5,9%                    | 5,4%                    |

Tabla 4 : Comparación de resultados de las 3 modelizaciones de un muelle sobre pilotes para varios casos de carga

Entre las conclusiones más importantes están

- 1) Los modelos realizados con la matriz de rigidez resultan ser la opción que privilegiar para encontrar los mismos resultados que en el modelo elastoplástico completo.
- 2) La diferencia entre el momento máximo y el mínimo es fácil de reproducir, incluso con modelos simplemente empotrados.

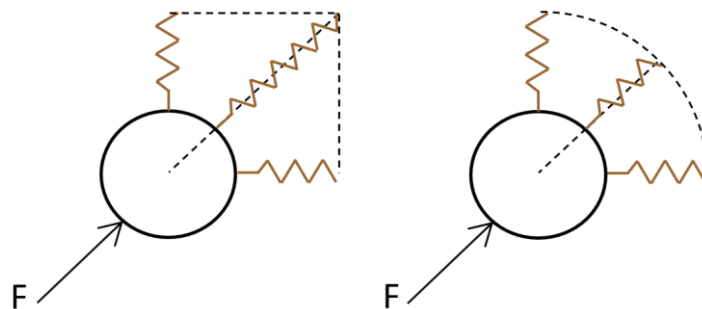
Sin embargo, los modelos empotrados dan resultados pobres para el momento máximo en el suelo. Esto se debe a que la fuerza de cizallamiento recibida es la misma pero la rigidez de las bases de los pilotes cambia. Todo el diagrama de momentos se desplaza, por lo que se mantiene la diferencia de momentos máximos y mínimos. A continuación se muestra un pequeño diagrama explicativo ;



*Figura 19 : Comparación de momentos entre un pilote empotrado y una rigidez equivalente*

- 1) En cuanto el modelo es adecuado para una carga, responde bien al resto de combinaciones y tipos de carga (desviación <10%). Sin embargo, en el caso de las cargas asimétricas en un lado del muelle, los resultados son menos precisos para los pilotes del otro lado cuando la geotecnia no es adecuada.

Esta diferencia se explica mediante conceptos de modelización más avanzados de SAP2000. En primer lugar, los pilotes deben modelarse con rotación libre sobre su eje (R1) para transmitir bien las fuerzas de torsión. Además, los muelles se definen para las direcciones X e Y ortogonales, y el resto de las direcciones se calculan automáticamente por proyección. Al no ser muelles axiales perfectamente isotrópicos, las cargas que no se producen en las direcciones X o Y pueden estar más alejadas de la realidad.



*Figura 20 : Comparación de resortes ortogonales y axiales*

- 2) Para concluir, al responder a la pregunta de cuál sería la profundidad de empotramiento correcta (xØ) para encontrar los resultados más precisos, hay que tener en cuenta que:
  - ✓ Se confirma que el valor del cociente de empuje pasivo movilizable/movilizado está ligado a la profundidad de empotramiento

- ✓ Dado que los pilotes se dimensionan normalmente por su capacidad portante y no por su carga horizontal, los cocientes de empuje pasivo suelen ser muy grandes y, por tanto, los resultados obtenidos para un pilote aislado en el capítulo anterior llegan a una asíntota en 0,5Ø cuando el suelo es uniforme.
- ✓ En este caso, se han elegido valores redondeados de xØ: 1Ø como máximo cuando la rigidez del suelo es cercana a 0,2 MPa y cocientes de empuje pasivo del orden de la unidad; y 0,5Ø cuando la rigidez aumenta y el cociente de empuje pasivo es muy elevado. Si el modelo de matriz de rigidez realizado no proporciona un ΔM similar al modelo elastoplástico o se requiere más precisión, bastaría con hacer la siguiente iteración para encontrar el xØ correcto:

$$(h + \phi x_{itération2}) = \frac{\Delta M_{élastoplastique}}{\Delta M_{itération1}} * (h + \phi x_{itération1})$$

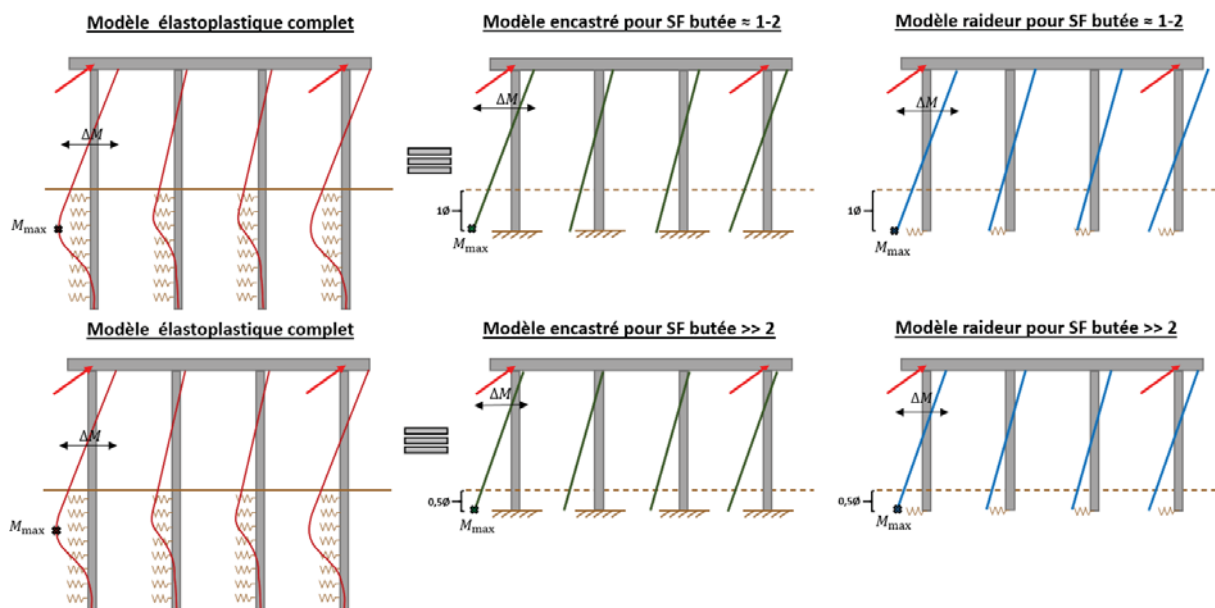


Figura 21 : Profundidades equivalentes entre los diferentes modelos de muelles sobre pilotes

### 5.3. Análisis de la presencia de una capa de suelo superficial de pobre calidad

Como se ha indicado anteriormente, la existencia de una capa de baja resistencia es habitual en este tipo de estructuras en un entorno marítimo. En este capítulo, su modelización muestra dicha influencia.

De nuevo, la presión de fluencia del limo será de 0,1 MPa, mientras que la de la capa inferior será de 0,2, 0,7 y 1,0 MPa, con el fin de comparar los resultados del primer ejercicio, para una carga de corta duración y un suelo granular. El espesor del limo se variará en incrementos de  $0,5\phi$  para comprender su influencia en los resultados.

Utilizando las conclusiones de un único pilote aislado, las profundidades aumentarían entre  $1/3$  y  $2/3$  del espesor de la capa de limo, aproximado a  $1/2$ .

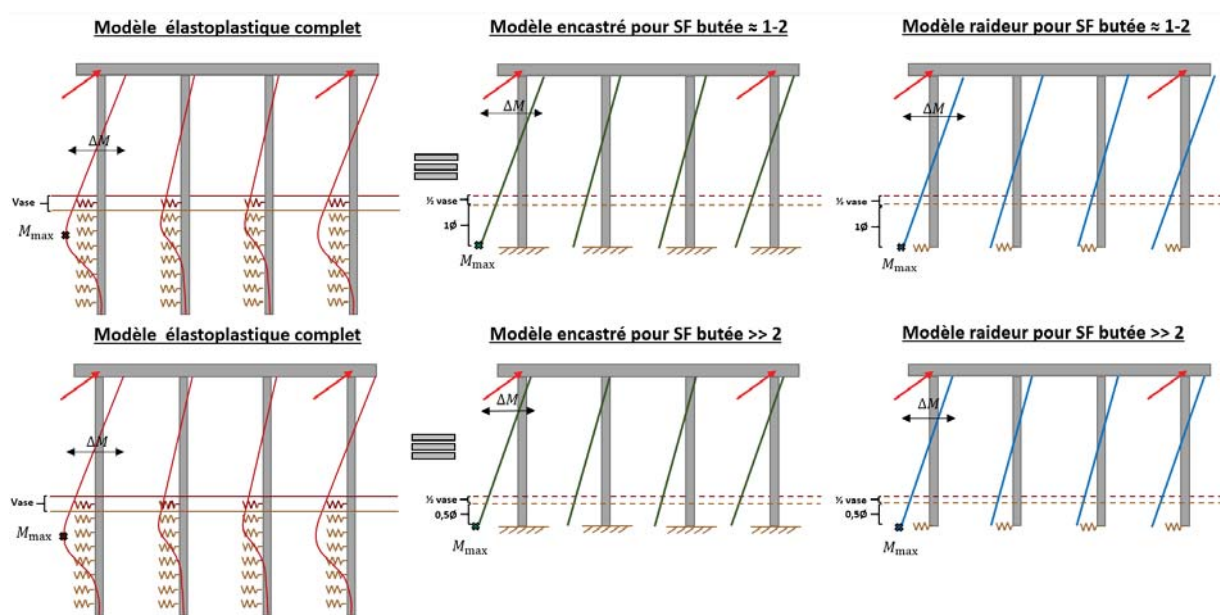


Figura 22 : Profundidades equivalentes entre los modelos de muelles sobre pilotes afectados por el limo

A continuación se muestran los nuevos resultados:

| Comparaison Modèles en Sable $P_f=0,2$ MPa; $E_m=4$ MPa et Vase $P_f=0,1$ MPa; $E_m=2$ MPa d'épaisseur $1\phi$ |                     |                     |                     |                     |                         |                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|
| Cas charge                                                                                                     | Accost sym 1000 kN  | Accost sym 4000 kN  | Accost sym 5500 kN  | Accost Asym 5500 kN | Accost+Mom Asym 5500 kN | Amarr Sym Incl 5000 kN |
| Pieu critique                                                                                                  | B2                  | B2                  | B2                  | A2                  | A2                      | A1                     |
| Pied pieu                                                                                                      | $\phi+0,5\phi=1,8m$ | $\phi+0,5\phi=1,8m$ | $\phi+0,5\phi=1,8m$ | $\phi+0,5\phi=1,8m$ | $\phi+0,5\phi=1,8m$     | $\phi+0,5\phi=1,8m$    |
| SF butée pieu critique                                                                                         | 9,1                 | 2,26                | 1,66                | 1,61                | 1,61                    | 1,83                   |
| Modèle EP complet                                                                                              | -1030               | -4386               | -6097               | -6292               | -6313                   | 5379                   |
| Modèle encastré                                                                                                | -1418               | -5670               | -7796               | -9112               | -9220                   | 7453                   |
| % erreur                                                                                                       | 37,6%               | 29,3%               | 27,9%               | 44,8%               | 46,0%                   | 38,6%                  |
| Modèle matrice de raideur                                                                                      | -1121               | -4482               | -6163               | -7237               | -7289                   | 5546                   |
| % erreur                                                                                                       | 8,8%                | 2,2%                | 1,1%                | 15,0%               | 15,5%                   | 3,1%                   |
| Modèle EP complet                                                                                              | 2065                | 9166                | 13188               | 13706               | 13810                   | 12310                  |
| Modèle encastré                                                                                                | 2164                | 8656                | 11903               | 13739               | 13946                   | 12452                  |
| % erreur                                                                                                       | 4,8%                | 5,6%                | 9,7%                | 0,2%                | 1,0%                    | 1,2%                   |
| Modèle matrice de raideur                                                                                      | 2166                | 8663                | 11906               | 13751               | 13900                   | 11502                  |
| % erreur                                                                                                       | 4,9%                | 5,5%                | 9,7%                | 0,3%                | 0,7%                    | 6,6%                   |
| Modèle EP complet                                                                                              | 0,0353              | 0,1954              | 0,3209              | 0,3371              | 0,3392                  | -0,2616                |
| Modèle encastré                                                                                                | 0,0170              | 0,0680              | 0,0935              | 0,1105              | 0,1115                  | -0,0813                |
| % erreur                                                                                                       | 51,9%               | 65,2%               | 70,9%               | 67,2%               | 67,1%                   | 68,9%                  |
| Modèle matrice de raideur                                                                                      | 0,0354              | 0,1415              | 0,1945              | 0,2296              | 0,2310                  | -0,1711                |
| % erreur                                                                                                       | 0,1%                | 27,6%               | 39,4%               | 31,9%               | 31,9%                   | 34,6%                  |

| Comparaison Modèles en Sable $P_f=0,2$ MPa; $E_m=4$ MPa et Vase $P_f=0,1$ MPa; $E_m=2$ MPa d'épaisseur $2\phi$ |                    |                    |                    |                     |                         |                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|
| Cas charge                                                                                                     | Accost sym 1000 kN | Accost sym 4000 kN | Accost sym 5500 kN | Accost Asym 5500 kN | Accost+Mom Asym 5500 kN | Amarr Sym Incl 5000 kN |
| Pieu critique                                                                                                  | B2                 | B2                 | B2                 | A2                  | A2                      | A1                     |
| Pied pieu                                                                                                      | $\phi+\phi=2,4m$   | $\phi+\phi=2,4m$   | $\phi+\phi=2,4m$   | $\phi+\phi=2,4m$    | $\phi+\phi=2,4m$        | $\phi+\phi=2,4m$       |
| SF butée pieu critique                                                                                         | 8,88               | 2,16               | 1,6                | 1,55                | 1,54                    | 1,75                   |
| Modèle EP complet                                                                                              | -1026              | -4510              | -6251              | -6464               | -6471                   | 5530                   |
| Modèle encastré                                                                                                | -1479              | -5918              | -8137              | -9504               | -9611                   | 7726                   |
| % erreur                                                                                                       | 44,2%              | 31,2%              | 30,2%              | 47,0%               | 48,5%                   | 39,7%                  |
| Modèle matrice de raideur                                                                                      | -1197              | -4787              | -6582              | -7721               | -7777                   | 5935                   |
| % erreur                                                                                                       | 16,6%              | 6,1%               | 5,3%               | 19,4%               | 20,2%                   | 7,3%                   |
| Modèle EP complet                                                                                              | 2085               | 9445               | 13557              | 14109               | 14200                   | 12597                  |
| Modèle encastré                                                                                                | 2277               | 9106               | 12521              | 14448               | 14653                   | 12897                  |
| % erreur                                                                                                       | 9,2%               | 3,6%               | 7,6%               | 2,4%                | 3,2%                    | 2,4%                   |
| Modèle matrice de raideur                                                                                      | 2277               | 9108               | 12523              | 14455               | 14607                   | 12026                  |
| % erreur                                                                                                       | 9,2%               | 3,6%               | 7,6%               | 2,4%                | 2,9%                    | 4,5%                   |
| Modèle EP complet                                                                                              | 0,0372             | 0,2089             | 0,3424             | 0,3602              | 0,3623                  | -0,2798                |
| Modèle encastré                                                                                                | 0,0194             | 0,0775             | 0,1065             | 0,1259              | 0,1269                  | -0,0927                |
| % erreur                                                                                                       | 47,9%              | 62,9%              | 68,9%              | 65,1%               | 65,0%                   | 66,9%                  |
| Modèle matrice de raideur                                                                                      | 0,0377             | 0,1508             | 0,2073             | 0,2446              | 0,2461                  | -0,1824                |
| % erreur                                                                                                       | 1,4%               | 27,8%              | 39,4%              | 32,1%               | 32,1%                   | 34,8%                  |

| Comparaison Modèles en Sable $P_f=0,7$ MPa; $E_m=14$ MPa et Vase $P_f=0,1$ MPa; $E_m=2$ MPa d'épaisseur $1\phi$ |                        |                        |                        |                        |                         |                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| Cas charge                                                                                                      | Accost sym 1000 kN     | Accost sym 4000 kN     | Accost sym 5500 kN     | Accost Asym 5500 kN    | Accost+Mom Asym 5500 kN | Amarr Sym Incl 5000 kN |
| Pieu critique                                                                                                   | B2                     | B2                     | B2                     | A2                     | A2                      | A1                     |
| Pied pieu                                                                                                       | $0,5\phi+0,5\phi=1,2m$ | $0,5\phi+0,5\phi=1,2m$ | $0,5\phi+0,5\phi=1,2m$ | $0,5\phi+0,5\phi=1,2m$ | $0,5\phi+0,5\phi=1,2m$  | $0,5\phi+0,5\phi=1,2m$ |
| SF butée pieu critique                                                                                          | 24,69                  | 6                      | 4,39                   | 3,95                   | 3,92                    | 4,76                   |
| Modèle EP complet                                                                                               | -1110                  | -4575                  | -6296                  | -6914                  | -6952                   | 5617                   |
| Modèle encastré                                                                                                 | -1355                  | -5421                  | -7453                  | -8718                  | -8827                   | 7177                   |
| % erreur                                                                                                        | 22,1%                  | 18,5%                  | 18,4%                  | 26,1%                  | 27,0%                   | 27,8%                  |
| Modèle matrice de raideur                                                                                       | -1176                  | -4705                  | -6470                  | -7583                  | -7655                   | 5948                   |
| % erreur                                                                                                        | 6,0%                   | 2,9%                   | 2,8%                   | 9,7%                   | 10,1%                   | 5,9%                   |
| Modèle EP complet                                                                                               | 2074                   | 8535                   | 11924                  | 13251                  | 13379                   | 11751                  |
| Modèle encastré                                                                                                 | 2051                   | 8206                   | 11283                  | 13030                  | 13238                   | 12007                  |
| % erreur                                                                                                        | 1,1%                   | 3,9%                   | 5,4%                   | 1,7%                   | 1,1%                    | 2,2%                   |
| Modèle matrice de raideur                                                                                       | 2060                   | 8241                   | 11331                  | 13072                  | 13243                   | 11381                  |
| % erreur                                                                                                        | 0,6%                   | 3,4%                   | 5,0%                   | 1,4%                   | 1,0%                    | 3,1%                   |
| Modèle EP complet                                                                                               | 0,0299                 | 0,1270                 | 0,1877                 | 0,2146                 | 0,2161                  | -0,1580                |
| Modèle encastré                                                                                                 | 0,0148                 | 0,0593                 | 0,0815                 | 0,0964                 | 0,0973                  | -0,0708                |
| % erreur                                                                                                        | 50,5%                  | 53,3%                  | 56,6%                  | 55,1%                  | 55,0%                   | 55,2%                  |
| Modèle matrice de raideur                                                                                       | 0,0237                 | 0,0948                 | 0,1304                 | 0,1541                 | 0,1553                  | -0,1140                |
| % erreur                                                                                                        | 20,7%                  | 25,3%                  | 30,5%                  | 28,2%                  | 28,2%                   | 27,9%                  |

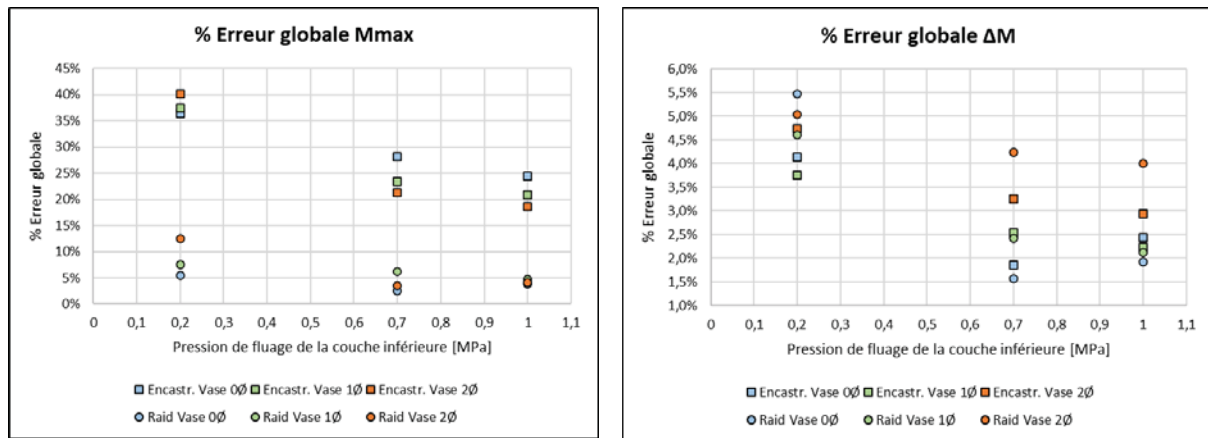
| Comparaison Modèles en Sable $P_f=0.7$ MPa; $E_m=14$ MPa et Vase $P_f=0.1$ MPa; $E_m=2$ MPa d'épaisseur 2Ø |                    |                    |                    |                     |                         |                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| Cas charge                                                                                                 | Accost sym 1000 kN | Accost sym 4000 kN | Accost sym 5500 kN | Accost Asym 5500 kN | Accost+Mom Asym 5500 kN | Amarr Sym Incln 5000 kN |
| Pieu critique                                                                                              | B2                 | B2                 | B2                 | A2                  | A2                      | A1                      |
| Pied pieu                                                                                                  | 0,5Ø+1,0Ø=1,8m     | 0,5Ø+1,0Ø=1,8m     | 0,5Ø+1,0Ø=1,8m     | 0,5Ø+1,0Ø=1,8m      | 0,5Ø+1,0Ø=1,8m          | 0,5Ø+1,0Ø=1,8m          |
| SF butée pieu critique                                                                                     | 23,26              | 5,46               | 3,96               | 3,95                | 3,6                     | 4,32                    |
| Modèle EP complet                                                                                          | -1128              | -4867              | -6739              | -7443               | -7484                   | 6011                    |
| Modèle encastré                                                                                            | -1418              | -5670              | -7796              | -9112               | -9220                   | 7453                    |
| % erreur                                                                                                   | <b>25,7%</b>       | <b>16,5%</b>       | <b>15,7%</b>       | <b>22,4%</b>        | <b>23,2%</b>            | <b>24,0%</b>            |
| Modèle matrice de raideur                                                                                  | -1143              | -4573              | -6288              | -7379               | -7436                   | 5678                    |
| % erreur                                                                                                   | <b>1,4%</b>        | <b>6,0%</b>        | <b>6,7%</b>        | <b>0,9%</b>         | <b>0,6%</b>             | <b>5,5%</b>             |
| Modèle EP complet                                                                                          | 2145               | 9117               | 12764              | 14222               | 14354                   | 12384                   |
| Modèle encastré                                                                                            | 2164               | 8656               | 11903              | 13739               | 13946                   | 12452                   |
| % erreur                                                                                                   | <b>0,9%</b>        | <b>5,1%</b>        | <b>6,8%</b>        | <b>3,4%</b>         | <b>2,8%</b>             | <b>0,5%</b>             |
| Modèle matrice de raideur                                                                                  | 2168               | 8673               | 11925              | 13762               | 13916                   | 11572                   |
| % erreur                                                                                                   | <b>1,1%</b>        | <b>4,9%</b>        | <b>6,6%</b>        | <b>3,2%</b>         | <b>3,1%</b>             | <b>6,6%</b>             |
| Modèle EP complet                                                                                          | 0,0336             | 0,1469             | 0,2162             | 0,2463              | 0,2480                  | -0,1826                 |
| Modèle encastré                                                                                            | 0,0170             | 0,0680             | 0,0935             | 0,1105              | 0,1115                  | -0,0813                 |
| % erreur                                                                                                   | <b>49,4%</b>       | <b>53,7%</b>       | <b>56,8%</b>       | <b>55,1%</b>        | <b>55,0%</b>            | <b>55,5%</b>            |
| Modèle matrice de raideur                                                                                  | 0,0335             | 0,1334             | 0,1834             | 0,2166              | 0,2179                  | -0,1611                 |
| % erreur                                                                                                   | <b>0,2%</b>        | <b>9,2%</b>        | <b>15,2%</b>       | <b>12,1%</b>        | <b>12,1%</b>            | <b>11,7%</b>            |

| Comparaison Modèles en Sable $P_f=1$ MPa; $E_m=20$ MPa et Vase $P_f=0.1$ MPa; $E_m=1$ MPa d'épaisseur 1Ø |                    |                    |                    |                     |                         |                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| Cas charge                                                                                               | Accost sym 1000 kN | Accost sym 4000 kN | Accost sym 5500 kN | Accost Asym 5500 kN | Accost+Mom Asym 5500 kN | Amarr Sym Incln 5000 kN |
| Pieu critique                                                                                            | B2                 | B2                 | B2                 | A2                  | A2                      | A1                      |
| Pied pieu                                                                                                | 0,5Ø+0,5Ø=1,2m     | 0,5Ø+0,5Ø=1,2m     | 0,5Ø+0,5Ø=1,2m     | 0,5Ø+0,5Ø=1,2m      | 0,5Ø+0,5Ø=1,2m          | 0,5Ø+0,5Ø=1,2m          |
| SF butée pieu critique                                                                                   | 32,87              | 8,22               | 5,88               | 5,17                | 5,13                    | 6,3                     |
| Modèle EP complet                                                                                        | -1135              | -4534              | -6350              | -7183               | -7234                   | 5746                    |
| Modèle encastré                                                                                          | -1355              | -5421              | -7453              | -8718               | -8827                   | 7177                    |
| % erreur                                                                                                 | <b>19,4%</b>       | <b>19,6%</b>       | <b>17,4%</b>       | <b>21,4%</b>        | <b>22,0%</b>            | <b>24,9%</b>            |
| Modèle matrice de raideur                                                                                | -1184              | -4735              | -6510              | -7629               | -7702                   | 5993                    |
| % erreur                                                                                                 | <b>4,3%</b>        | <b>4,4%</b>        | <b>2,5%</b>        | <b>6,2%</b>         | <b>6,5%</b>             | <b>4,3%</b>             |
| Modèle EP complet                                                                                        | 2080               | 8365               | 11726              | 13348               | 13491                   | 11754                   |
| Modèle encastré                                                                                          | 2051               | 8206               | 11283              | 13030               | 13238                   | 12007                   |
| % erreur                                                                                                 | <b>1,4%</b>        | <b>1,9%</b>        | <b>3,8%</b>        | <b>2,4%</b>         | <b>1,9%</b>             | <b>2,2%</b>             |
| Modèle matrice de raideur                                                                                | 2060               | 8240               | 11330              | 13070               | 13242                   | 11403                   |
| % erreur                                                                                                 | <b>0,9%</b>        | <b>1,5%</b>        | <b>3,4%</b>        | <b>2,1%</b>         | <b>1,8%</b>             | <b>3,0%</b>             |
| Modèle EP complet                                                                                        | 0,0286             | 0,1183             | 0,1704             | 0,1979              | 0,1993                  | -0,1439                 |
| Modèle encastré                                                                                          | 0,0148             | 0,0593             | 0,0815             | 0,0964              | 0,0973                  | -0,0708                 |
| % erreur                                                                                                 | <b>48,3%</b>       | <b>49,9%</b>       | <b>52,2%</b>       | <b>51,3%</b>        | <b>51,2%</b>            | <b>50,8%</b>            |
| Modèle matrice de raideur                                                                                | 0,0233             | 0,0932             | 0,1282             | 0,1515              | 0,1526                  | -0,1120                 |
| % erreur                                                                                                 | <b>18,6%</b>       | <b>21,2%</b>       | <b>24,8%</b>       | <b>23,5%</b>        | <b>23,4%</b>            | <b>22,2%</b>            |

| Comparaison Modèles en Sable $P_f=1$ MPa; $E_m=20$ MPa et Vase $P_f=0.1$ MPa; $E_m=1$ MPa d'épaisseur 2Ø |                    |                    |                    |                     |                         |                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| Cas charge                                                                                               | Accost sym 1000 kN | Accost sym 4000 kN | Accost sym 5500 kN | Accost Asym 5500 kN | Accost+Mom Asym 5500 kN | Amarr Sym Incln 5000 kN |
| Pieu critique                                                                                            | B2                 | B2                 | B2                 | A2                  | A2                      | A1                      |
| Pied pieu                                                                                                | 0,5Ø+1,0Ø=1,8m     | 0,5Ø+1,0Ø=1,8m     | 0,5Ø+1,0Ø=1,8m     | 0,5Ø+1,0Ø=1,8m      | 0,5Ø+1,0Ø=1,8m          | 0,5Ø+1,0Ø=1,8m          |
| SF butée pieu critique                                                                                   | 30,45              | 7,36               | 5,32               | 4,67                | 4,64                    | 5,74                    |
| Modèle EP complet                                                                                        | -1156              | -4849              | -6812              | -7713               | -7766                   | 6178                    |
| Modèle encastré                                                                                          | -1418              | -5670              | -7796              | -9112               | -9220                   | 7453                    |
| % erreur                                                                                                 | <b>22,6%</b>       | <b>16,9%</b>       | <b>14,5%</b>       | <b>18,1%</b>        | <b>18,7%</b>            | <b>20,6%</b>            |
| Modèle matrice de raideur                                                                                | -1156              | -4622              | -6355              | -7456               | -7514                   | 5750                    |
| % erreur                                                                                                 | <b>0,0%</b>        | <b>4,7%</b>        | <b>6,7%</b>        | <b>3,3%</b>         | <b>3,2%</b>             | <b>6,9%</b>             |
| Modèle EP complet                                                                                        | 2160               | 8989               | 12608              | 14353               | 14498                   | 12447                   |
| Modèle encastré                                                                                          | 2164               | 8656               | 11903              | 13739               | 13946                   | 12452                   |
| % erreur                                                                                                 | <b>0,2%</b>        | <b>3,7%</b>        | <b>5,6%</b>        | <b>4,3%</b>         | <b>3,8%</b>             | <b>0,0%</b>             |
| Modèle matrice de raideur                                                                                | 2169               | 8676               | 11929              | 13766               | 13921                   | 11608                   |
| % erreur                                                                                                 | <b>0,4%</b>        | <b>3,5%</b>        | <b>5,4%</b>        | <b>4,1%</b>         | <b>4,0%</b>             | <b>6,7%</b>             |
| Modèle EP complet                                                                                        | 0,0326             | 0,1387             | 0,1989             | 0,2306              | 0,2322                  | -0,1691                 |
| Modèle encastré                                                                                          | 0,0170             | 0,0680             | 0,0935             | 0,1105              | 0,1115                  | -0,0813                 |
| % erreur                                                                                                 | <b>47,9%</b>       | <b>51,0%</b>       | <b>53,0%</b>       | <b>52,1%</b>        | <b>52,0%</b>            | <b>51,9%</b>            |
| Modèle matrice de raideur                                                                                | 0,0324             | 0,1295             | 0,1780             | 0,2102              | 0,2116                  | -0,1563                 |
| % erreur                                                                                                 | <b>0,8%</b>        | <b>6,7%</b>        | <b>10,5%</b>       | <b>8,9%</b>         | <b>8,9%</b>             | <b>7,5%</b>             |

Tabla 5 : Comparación de resultados de 3 modelizaciones de un muelle sobre pilotes según el espesor de la capa de limo y la rigidez del suelo.

Para sintetizar esta información, los errores que proporcionan estas técnicas son agrupados en las figuras siguientes.



*Figura 23 : Errores esperados para modelos de empotramientos y de matrices de rigidez*

Como puede constatarse, los modelos de matrices de rigidez son claramente superiores para predecir ambos, momentos flectores máximos en el suelo (error inferior al 10%) y diferencia entre momento flector máximo y mínimo (error del 5%); mientras que los modelos de empotramientos solamente se muestran útiles para predecir la diferencia entre momento máximo y mínimo.

Una segunda observación es la gran dificultad de modelizar el desplazamiento del muelle al mismo tiempo que el momento flector, los errores son importantes incluso con modelos de matrices de rigidez.

Por último, se observa que cuando la capa de limo tiene una rigidez muy cercana a la del suelo inferior (0.2MPa en este ejemplo) los resultados son menos precisos. Esto se debe a que una única regla de oro se ha utilizado: la mitad del espesor del limo debe ser ignorado, y sin embargo, 1/3 hubiera sido más adecuado. En la misma línea, si la diferencia de rigideces fuese muy grande, ignorar 2/3 hubiese sido más preciso.

Se concluye que existen diferencias, pero, que dichas modelizaciones cumplen los objetivos de encontrar reglas simples para la práctica, de confirmar que los errores son aceptables y de conocer el origen de los mismos.

## 6. Conclusión

---

El objetivo de este proyecto de fin de carrera era analizar los diferentes modelos y leyes de interacción suelo-estructura para pilotes aislados, como los duques de alba, o para muelles sobre pilotes, sometidos a importantes cargas horizontales. Más concretamente, el objetivo era el análisis de las desviaciones de los resultados para comprender su origen y elegir la solución más adecuada a cada situación.

El marco teórico es globalmente escaso, a menudo basado en pruebas del siglo pasado y en la experiencia de las empresas. Sin embargo, es de suma importancia para el tipo de estructuras que se encuentran en el ámbito marítimo, que se ven más afectadas por las cargas horizontales que por las verticales. En Francia, las leyes de interacción utilizadas en la práctica se encuentran en la norma NF P94-262 y se basan en las pruebas del presiometro de Ménard de 1962.

Durante el presente TFM, se creó una herramienta de preprocesamiento para modelar rápidamente estas estructuras en SAP2000 con las leyes de interacción elastoplásticas de la norma. La necesidad de esta herramienta surgió tras el fallo del software interno CGB, utilizado hasta 2021. Ella permite a la empresa ahorrar el tiempo dedicado a la creación del modelo, así como la licencia de un software externo más específico.

Las diferentes complejidades de los modelos permiten alcanzar un equilibrio entre la precisión de los resultados y el tiempo invertido en su creación y funcionamiento. Este tiempo es de gran importancia durante la fase de licitación de la empresa, en la que muchos proyectos tienen que entregarse rápidamente. El análisis de las diferencias ayuda a tranquilizar a los ingenieros y a los clientes a la hora de tomar decisiones.

El análisis de diferencias incluye modelos elastoplásticos complejos y su simplificación a modelos lineales de empotramientos o matrices de rigidez que pueden resolverse con un simple conocimiento en resistencia de materiales, de forma justificada. Los resultados clave para las profundidades que dan el mismo punto de empotramiento, el desplazamiento máximo y el momento de flexión máximo entre los modelos se han condensado en unos simples gráficos y reglas. Para ello se han tenido en cuenta los efectos de la rigidez del suelo, el cociente de empuje pasivo movilizable/movilizado, la duración de la carga, el carácter cohesivo o granular del suelo y el espesor de una capa de limo superficial.

Para comenzar, en lo que respecta a un solo pilote aislado en suelo uniforme, tres cocientes de empuje pasivo movilizable/movilizado son fijados según los criterios precisados en las normas (1.1, 1.5 et 2.0). Los abanicos siguientes muestran el conjunto de profundidades extremas para el cálculo según las 4 combinaciones de duración de la carga (larga o corta duración) y tipo de suelo (cohesivo o granular):

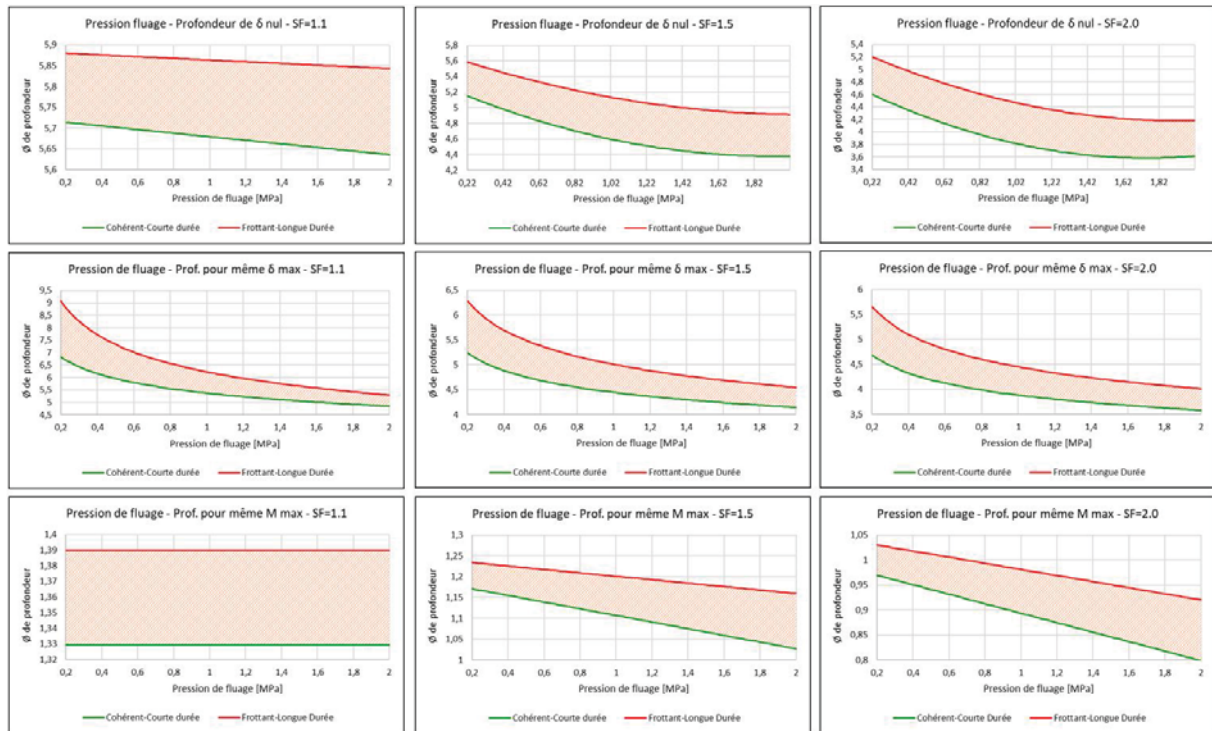


Figura 24 : Enveloppes des profondeurs des différentes durées de chargement et type de sol

Para comprender la influencia del limo superficial de pobre resistencia, un caso muy común en las estructuras marinas, se repitieron las simulaciones añadiendo una capa de baja rigidez que aumentaba de espesor ( $0\emptyset$ ,  $0,5\emptyset$ ,  $1\emptyset$ ,  $1,5\emptyset$ ,  $2\emptyset$ ). La conclusión simplificada es que hay que añadir entre  $1/3$  y  $2/3$  del espesor de la capa de limo a los resultados de profundidad mostrados anteriormente para encontrar el momento flector máximo.

En una segunda parte del TFM, el problema se amplió a los muelles sobre pilotes. Los modelos elastoplásticos no lineales se compararon con modelos de pilotes empotrados o con matrices de rigidez. Las matrices de rigidez resultaron ser la opción preferida para simular los mismos diagramas de momentos (momentos flectores máximos y diferencia entre máximo-mínimo); mientras que un modelo empotrado a la profundidad adecuada bastaría para modelar la diferencia de momentos máximo-mínimo. Para encontrar esta profundidad son útiles los resultados del pilote aislado:  $1\emptyset$  como máximo cuando la rigidez del suelo es cercana a 0,2

MPa y el suelo está ampliamente plastificado (cociente de empuje movilizable/movilizado próximo a la unidad); y 0,5Ø cuando la rigidez aumenta y el cociente es muy alto. Si se requiere más precisión entre el modelo de matriz de rigidez y el modelo elastoplástico completo, se debe iterar con estos valores de  $x_0$  y  $\Delta M$ .

En la misma línea, cuando hay una capa de limo de baja rigidez, se puede ignorar entre 1/3 y 2/3 de su espesor para encontrar el momento flector máximo. Si se ignora 1/2 de la capa, las diferencias de resultados entre un modelo de matriz de rigidez y un modelo elastoplástico son aceptables para la fase de licitación:

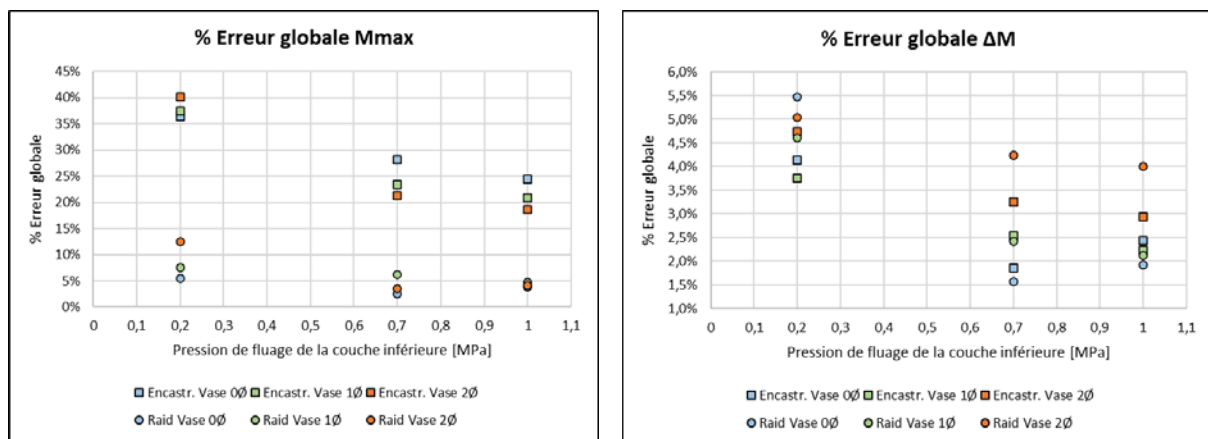


Figura 25 : Errores esperados para los modelos de empotramientos o de matrices de rigidez

El propio análisis está limitado por la complejidad de las leyes de interacción. Una ley de interacción no lineal con varios segmentos podría dar resultados más precisos que los obtenidos. Sin embargo, la complejidad de la codificación de esta ley, el tiempo de cálculo añadido y la falta de normativa oficial demuestran que no sería adecuada para un mercado rápido como el existente en VCMF. En la misma línea, para los modelos de matrices de rigidez, sólo se utiliza el pilote más cargado para hacer la matriz, que se aplica por igual para todos ellos, con los valores de rigidez de desplazamiento y rotación iguales para todas las direcciones. Hacer una matriz específica para cada pila y dirección significaría perder más tiempo que con el modelo elastoplástico completo.

Como se ha explicado, existen algunas limitaciones relacionadas con la modelización que ofrece SAP2000, de carácter insignificante. Están relacionados con la transmisión de fuerzas de torsión y con el hecho de que los muelles no pueden ser perfectamente isotrópicos axialmente.

Otra consideración importante es la geometría analizada. Para seguir una metodología rigurosa, en todos los casos se utilizaron dimensiones realistas y se mantuvieron en cada estudio para obtener resultados coherentes. Los parámetros se modificaron siempre adimensionalmente, como el espesor de la capa de limo expresado como fracción del diámetro del pilote. Sin embargo, otras geometrías que no cambian sus dimensiones proporcionalmente pueden dar resultados con mayores diferencias.

Las siguientes mejoras propuestas consisten, por un lado, en la herramienta de preprocesamiento de datos:

- Conseguir un tiempo de cálculo (incluso) mejor con una declaración más específica de las variables (más o menos cantidad de bits de cada una);
- Disminuir el número de discretizaciones con la profundidad, ya que los cambios más importantes se dan para las capas superficiales;
- Añadir la posibilidad de tener en cuenta la existencia de una berma a la altura de la entrada del pilote en el terreno cuando exista un talud en las proximidades;
- Añadir la posibilidad de elegir el valor y la ubicación de diferentes tipos de cargas.

Por otro lado, mejoras en el propio análisis. El estudio se realizó en todos los casos variando la carga aplicada al muelle o pilote, manteniendo la misma geometría. Sin embargo, ¿sería útil disponer de un estudio adicional en el que la carga se mantuviera constante pero la profundidad del pilote cambiara? Responder positivamente a esta pregunta supone aumentar la dificultad del estudio, ya que la forma de introducir los datos en SAP2000 implicaría modelar más resortes por cada longitud añadida, de forma iterativa. Para el TFM se consideró más interesante centrarse en el análisis de los resultados que dedicar el tiempo a una modelización repetitiva.

Para concluir, hay que subrayar que, una vez concluido el estudio, queda la parte más importante, que es la aplicación de las normas simplificadas a los nuevos proyectos y su eventual comparación con el modelo elastoplástico completo. Con el tiempo, esto permitiría reafirmar la validez de los resultados e incluso modificarlos en función de la experiencia acumulada. Las líneas de modelización más potentes del futuro deberán orientarse hacia la mecánica tridimensional de los medios continuos.

## Bibliografía

- [1] ARISTAGHES P. (1986) *Conception des quais sur pieux*. Centre d'études techniques maritimes et fluviales. PM 86.04, 106 p.
- [2] BAGUELIN F., BROM B. (1987) *Interactions sols-structures. Rapports Généraux et conférences spéciales. Fondations profondes*. Session II. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Nantes.
- [3] BAGUELIN F., CALGARO, JOAN (1976) *Justification et calcul manuel des fondations sur pieux*. Piece 5 Bis 1 du Dossier FOND 72. Ministère de l'équipement et du logement. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, SETRA.
- [4] BAGUELIN F., JEZEQUEL J., SHIELDS D. (1978) *The pressuremeter and foundation engineering*. Trans Tech Publications
- [5] BRINCH-HANSEN J. (1961) *The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces*. Geotechnisk Institut, Copenhagen. Bulletin 12.
- [6] BROMS B. (1964) *Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils*. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE. Vol 90 Issue 2. Mars 1964
- [7] BROMS B. (1964) *Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils*. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE. Vol 90 Issue 3. Mai 1964
- [8] BLUM H. (1932) *Wirtschaftliche Dalbenformen und deren Berechnung*. Bautechnik. Heft 5.
- [9] HOUY. A (1986). *Dimensionnement des ouvrages en palplanches en acier*. IFSTTAR
- [10] HUGUES et al. (1979) *Predicted and measured behaviour of laterally loaded piles for the Westgate Freeways Melbourne*. Paper presented to the Victoria Geomechanical Society, Melbourne, Australia.
- [11] MENARD L. (1962) *Comportement d'une fondation profonde soumise à des efforts de renversement*. Sols-soils 3, 4<sup>ème</sup> trimestre.
- [12] MINISTERE DE L'EQUIPEMENT, DU LOGEMENT ET DES TRANSPORTS. *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages de génie civil*. Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux passés au nom de l'Etat. Fascicule n°62 – Titre V. (1993), 189 p.
- [13] MINISTERIO DE FOMENTO. *Documento Básico Seguridad Estructural Cimientos - Código Técnico de la Edificación*. Madrid. (2019) , 165 p.
- [14] MINISTERIO DE FOMENTO. *Guía para el proyecto de cimentaciones en obras de carretera con Eurocódigo 7: Bases del proyecto geotécnico*. Madrid. (2019), 165 p.

- [15] NF EN 1997-1, Eurocode 7 – Calcul géotechnique – Partie 1 : Règles générales.
- [16] NF EN 1997-2, Eurocode 7 – Calcul géotechnique – Partie 2 : Reconnaissance et essais géotechniques
- [17] NF P 94-110-1, Sols : Reconnaissance et essais – Essai pressiométrique Ménard – Partie 1 : Essai sans cycle
- [18] NF P 94-262, Calcul géotechnique – Fondations sur pieux
- [19] NF P 94-282, Calcul géotechnique – Ouvrages de soutènement – Ecrans
- [20] PUERTOS DEL ESTADO (2005) ROM 0.5-05 *Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias*. I.S.B.N.: 84-88975-52-X. 546 p.
- [21] REESE L., COX W., KOOP F. (1974) *Analysis of laterally loaded piles in sand*. Sixth Annual Offshore Technology Conference, Vol. 2, Paper 2080, Houston, Texas.
- [22] Recommandations ROSA 2000. Ouvrages. Ducs d’Albe.
- [23] Reconnaissance et essais géotechniques – Essais en place – Partie 1 – Essai au pénétromètre statique point mécanique ISO 4356
- [24] Reconnaissance et essais géotechniques – Essais en place – Partie 4 – Essai au pressiomètre Ménard. NF EN ISO 22476-12
- [25] ROBERTSON et al. (1986) *The pressuremeter and its marine application*. ASTM STP 950, Texas A&M University.
- [26] WINKLER E. (1868) *Die Lehre von der Elasticität und Festigkeit*. Prag. Verlag H. Dominicus.

# **Anexos**

## Anexo 1 : Código de la Macro de preprocesamiento de datos DAC

```

Sub DAC()
    'int pour résultat intermédiaire, sor pour donnée de sortie
    Dim i As Integer, j As Integer
    Dim nbcou As Integer, nbniv As Integer, nblink As Integer, nbnivpen As Integer
    Dim nbint1 As Double, nbint2 As Double, nbint3 As Double, nbint4 As Double
    Dim nent As Long
    Dim inter1 As Variant, inter2 As Variant, inter3 As Variant
    Dim tabentpieu As Variant, tabentniv As Variant, tabentgeo As Variant, tabentres As Variant
    Dim tabintniv As Variant
    Dim tabsorcf As Variant, tabsorcl As Variant, tabsorfp01g As Variant, tabsorfsa As Variant, tabsorcjc As Variant
    Dim tabsorjra As Variant, tabsorlp01g As Variant, tabsorlp03m As Variant, tabsorlpa As Variant, tabsormp01g As Variant
    Dim tabsormp02bmp As Variant, tabsormp03asd As Variant
    Dim tp As String
    Dim loiabattement As String

    'Ces trois lignes permettent réduire le temps de calcul à la moitié
    Application.ScreenUpdating = False
    Application.DisplayStatusBar = False
    Application.Calculation = xlManual

    nbcou = 0
    While ThisWorkbook.Sheets("DAC").Cells(12 + nbcou, 1) <> "Neant" And nbcou < 10
        nbcou = nbcou + 1
    Wend

    'Insérer tous les données dans des matrices pour son utilisation postérieur permet réduire le temps de calcul x10 contre
    à appeler individuellement chaque fois qu'on a besoin
    tabentpieu = Range(ThisWorkbook.Sheets("DAC").Cells(1, 2), ThisWorkbook.Sheets("DAC").Cells(5, 2))
    tabentniv = Range(ThisWorkbook.Sheets("DAC").Cells(7, 2), ThisWorkbook.Sheets("DAC").Cells(9, 2))
    tabentgeo = Range(ThisWorkbook.Sheets("DAC").Cells(13, 1), ThisWorkbook.Sheets("DAC").Cells(12 + nbcou, 7))
    tabentres = Range(ThisWorkbook.Sheets("DAC").Cells(24, 2), ThisWorkbook.Sheets("DAC").Cells(29, 2))

    loiabattement = ThisWorkbook.Sheets("DAC").Cells(31, 2)

    'Définition de tous les niveaux à prendre en compte au dessous du TN: tronçons du pieu selon la hauteur découpage et
    selon couches du sol
    ReDim tabintniv(1 To Int(tabentniv(2, 1) - tabentniv(3, 1)) / tabentres(6, 1) + nbcou + 2, 1 To 4)

    'Première col, côtes des couches existantes
    tabintniv(1, 1) = tabentniv(2, 1)
    nbint1 = 1
    nbint2 = 1
    Do While tabentniv(3, 1) < tabentgeo(nbint1, 3)
        If tabentgeo(nbint1, 3) < tabintniv(nbint2, 1) Then
            tabintniv(nbint2 + 1, 1) = tabentgeo(nbint1, 3)
            nbint2 = nbint2 + 1
        End If
        If nbint1 = nbcou Then
            Exit Do
        End If
        nbint1 = nbint1 + 1
    Loop

```

```

tabintniv(nbint2 + 1, 1) = tabentniv(3, 1)
'Deuxième col, à remplir avec la valeur de la découpe
nbint3 = 1
For i = 1 To nbint2
    If (tabintniv(i, 1) - tabintniv(i + 1, 1)) / tabentres(6, 1) <> Int((tabintniv(i, 1) - tabintniv(i + 1, 1)) /
tabentres(6, 1)) Then
        tabintniv(nbint3, 2) = tabentres(6, 1) * ((tabintniv(i, 1) - tabintniv(i + 1, 1)) / tabentres(6, 1) -
Int((tabintniv(i, 1) - tabintniv(i + 1, 1)) / tabentres(6, 1)))
        nbint3 = nbint3 + 1
    End If
    If Int((tabintniv(i, 1) - tabintniv(i + 1, 1)) / tabentres(6, 1)) <> 0 Then
        For j = 1 To Int((tabintniv(i, 1) - tabintniv(i + 1, 1)) / tabentres(6, 1))
            tabintniv(nbint3, 2) = tabentres(6, 1)
            nbint3 = nbint3 + 1
        Next
    End If
Next
'Troisième col
tabintniv(1, 3) = tabentniv(2, 1) - tabintniv(1, 2) / 2
If nbint3 <> 1 Then
    For i = 2 To nbint3 - 1
        tabintniv(i, 3) = tabintniv(i - 1, 3) - tabintniv(i - 1, 2) / 2 - tabintniv(i, 2) / 2
    Next
End If
'Quatrième col
For i = 1 To nbint3 - 1
    nbint4 = 1
    Do While tabintniv(i, 3) < tabentgeo(nbint4, 3)
        If nbint4 = nbcou Then
            Exit Do
        End If
        nbint4 = nbint4 + 1
    Loop
    tabintniv(i, 4) = tabentgeo(nbint4, 1)
Next

nbniv = nbint3 - 1
nblink = nbint2

'Quelques résultats intermédiaires sont multipliés et divisés par 1000 pour éviter problèmes avec SAP2000 (mauvaise
interprétation: X.0000001 o X.999999)
For i = 1 To nbniv
    nent = 1000 * tabintniv(i, 3)
    tabintniv(i, 3) = nent / 1000
Next

'Règle pour le talus
nbnivpen = 0
If tabentres(2, 1) = "Oui" Then
    nbint1 = max(tabentniv(2, 1) - 5 * tabentpieu(2, 1) / tabentres(4, 1), tabentres(5, 1))
    Do While tabintniv(nbnivpen + 1, 3) > nbint1
        nbnivpen = nbnivpen + 1
        If nbnivpen = nbniv Then
            Exit Do
        End If
    Loop
End If

```

```

'préparer les matrices pour les données de sortie aux feuilles correspondantes
ReDim tabsorcf(1 To 1, 1 To 4)
ReDim tabsorcl(1 To nbniv, 1 To 3)
ReDim tabsorfp01g(1 To 1, 1 To 42)
ReDim tabsorfsa(1 To 1, 1 To 7)
ReDim tabsorjrc(1 To 2 + nbniv, 1 To 8)
ReDim tabsorjra(1 To 1, 1 To 7)
ReDim tabsorlp01g(1 To nblink + nbnivpen, 1 To 17)
If tabentres(1, 1) = "Très courte durée" Then
    ReDim tabsorlp03m(1 To 14 * (nblink + nbnivpen), 1 To 13)
Else
    ReDim tabsorlp03m(1 To 10 * (nblink + nbnivpen), 1 To 13)
End If
ReDim tabsorlpa(1 To nbniv, 1 To 4)
ReDim tabsormp01g(1 To 1, 1 To 6)
ReDim tabsormp02bmp(1 To 1, 1 To 26)
ReDim tabsormp03asd(1 To 1, 1 To 12)

'compléter les matrices. D'abord Joint coordinates
For i = 1 To 2 + nbniv
    tabsorjrc(i, 2) = "GLOBAL"
    tabsorjrc(i, 3) = "Cartesian"
    tabsorjrc(i, 4) = 0
    tabsorjrc(i, 5) = 0
    tabsorjrc(i, 8) = "Yes"
Next

'PT signifie Tête de Pieu et PP Pied de Pieu
tabsorjrc(1, 1) = "PT"
tabsorjrc(2, 1) = "PP"
tabsorjrc(1, 7) = tabentniv(1, 1)
tabsorjrc(2, 7) = tabentniv(3, 1)
For i = 1 To nbniv
    tabsorjrc(2 + i, 1) = "P" & tabintniv(i, 3)
    tabsorjrc(2 + i, 7) = tabintniv(i, 3)
Next

'à ce moment on a juste la fonction "pipe", donc des formules adaptés à pieux circulaires
If tabentpieu(1, 1) = "Pipe" Then
    inter1 = tabentpieu(3, 1) * 1000
    inter2 = tabentpieu(4, 1) * 1000
    inter3 = tabentpieu(5, 1)
    tabsorfp01g(1, 1) = inter1 & " ep." & inter2 & " " & inter3
    tabsorfp01g(1, 2) = tabentpieu(5, 1)
    tabsorfp01g(1, 3) = "Pipe"
    tabsorfp01g(1, 5) = tabentpieu(3, 1)
    tabsorfp01g(1, 8) = tabentpieu(4, 1)
End If

tabsorcf(1, 1) = "P"
tabsorcf(1, 2) = "PT"
tabsorcf(1, 3) = "PP"
tabsorcf(1, 4) = "No"

tabsorjra(1, 1) = "PP"
tabsorjra(1, 2) = "No"

```

```

tabsojra(1, 3) = "No"
tabsojra(1, 4) = "Yes"
tabsojra(1, 5) = "No"
tabsojra(1, 6) = "No"
tabsojra(1, 7) = "No"

tabsofsa(1, 1) = tabsofcf(1, 1)
tabsofsa(1, 2) = "N.A."
tabsofsa(1, 3) = tabsofp01g(1, 1)
tabsofsa(1, 4) = "Default"

'Compléter la matrice de Connectivity Link et de Link Property Assignments
For i = 1 To nbniv
    For j = 1 To 3
        tabsocl(i, j) = "P" & tabintniv(i, 3)
    Next
    tabsoipa(i, 1) = "P" & tabintniv(i, 3)
    If i <= nbnivpen Then
        tabsoipa(i, 2) = tabintniv(i, 4) & tabintniv(i, 3)
    Else
        tabsoipa(i, 2) = tabintniv(i, 4)
    End If
    tabsoipa(i, 3) = "None"

    If loiabattement = "Frottant-4B" Then
        tabsoipa(i, 4) = tabintniv(i, 2) * max(0, min(1, 0.5 + (tabentniv(2, 1) - tabintniv(i, 3)) / (8 * tabentpieu(2, 1))))
    ElseIf loiabattement = "Cohérent-2B" Then
        tabsoipa(i, 4) = tabintniv(i, 2) * max(0, min(1, 0.5 + (tabentniv(2, 1) - tabintniv(i, 3)) / (4 * tabentpieu(2, 1))))
    End If
Next

'CALCUL ELASTOPLASTIQUE VOIR NORME NF 94-262
'-----Situation independante de s'il y a talus ou pas-----
nbint1 = 1
For i = 1 To nblink
    While tabentgeo(nbint1, 2) <= tabentniv(3, 1) Or tabentgeo(nbint1, 3) >= tabentniv(2, 1)
        nbint1 = nbint1 + 1
    Wend
    tabsoip01g(i, 1) = tabentgeo(nbint1, 1)
    For j = 1 To 2
        If tabentres(1, 1) = "Très courte durée" Then
            If tabentpieu(2, 1) >= 0.6 Then 'Kf: La norme définit une largeur de référence de 0.60 m pour distinguer
entre une ou autre formule de Kf
                tabsoip03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 1, 5) = 12 * 1000 * tabentgeo(nbint1, 4) / (4 / 3 * 0.6 /
tabentpieu(2, 1) * (2.65 * tabentpieu(2, 1) / 0.6) ^ tabentgeo(nbint1, 7) + tabentgeo(nbint1, 7))
            Else
                tabsoip03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 1, 5) = 12 * 1000 * tabentgeo(nbint1, 4) / (4 / 3 * 2.65 ^
tabentgeo(nbint1, 7) + tabentgeo(nbint1, 7)) 'Rigidité K1
            End If
            tabsoip03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 4, 10) = 0
            tabsoip03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 4, 11) = 0
            tabsoip03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 5, 10) = tabentpieu(2, 1) * 1000 * tabentgeo(nbint1, 5) 'Force
du palier plastique 1, r1=Bpf
            tabsoip03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 5, 11) = tabsoip03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 5, 10) /
tabsoip03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 1, 5) 'Déplacement palier 1
        End If
    Next
Next

```

```

        tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 6, 10) = tabentpieu(2, 1) * 1000 * tabentgeo(nbint1, 6) 'Force
du palier plastique 2, r2=Bpl
        tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 6, 11) = tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 5, 11) +
(tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 6, 10) - tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 5, 10)) / (tabsorlp03m(14 * (i -
1) + 7 * (j - 1) + 1, 5) / 2) 'Déplacement palier 2
        tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 7, 10) = tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 6, 10)
        tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 7, 11) = 10 * tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 6, 11)
        tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 3, 10) = -tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 5, 10) 'Force
palier 1 symmetrique
        tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 3, 11) = -tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 5, 11)
'Déplacement palier 1 symmetryque
        tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 2, 10) = -tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 6, 10) 'Force
palier 2 symmetrique
        tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 2, 11) = -tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 6, 11)
'Déplacement palier 2 symmetryque
        tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 1, 10) = -tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 7, 10)
        tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 1, 11) = -tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 7, 11)

ElseIf tabentres(1, 1) = "Courte durée" Then
    If tabentpieu(2, 1) >= 0.6 Then
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 5) = 12 * 1000 * tabentgeo(nbint1, 4) / (4 / 3 * 0.6 /
tabentpieu(2, 1) * (2.65 * tabentpieu(2, 1) / 0.6) ^ tabentgeo(nbint1, 7) + tabentgeo(nbint1, 7))
    Else
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 5) = 12 * 1000 * tabentgeo(nbint1, 4) / (4 / 3 * 2.65 ^
tabentgeo(nbint1, 7) + tabentgeo(nbint1, 7))
    End If
    tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 3, 10) = 0
    tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 3, 11) = 0
    tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 10) = tabentpieu(2, 1) * 1000 * tabentgeo(nbint1, 5)
    tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 11) = tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 10) /
tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 5)
    tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 5, 10) = tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 10)
    tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 5, 11) = 10 * tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 11)
    tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 2, 10) = -tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 10)
    tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 2, 11) = -tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 11)
    tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 10) = -tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 5, 10)
    tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 11) = -tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 5, 11)

ElseIf tabentres(1, 1) = "Longue durée" Then
    If tabentpieu(2, 1) >= 0.6 Then
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 5) = 12 * 1000 * tabentgeo(nbint1, 4) / 2 / (4 / 3 * 0.6 /
tabentpieu(2, 1) * (2.65 * tabentpieu(2, 1) / 0.6) ^ tabentgeo(nbint1, 7) + tabentgeo(nbint1, 7))
    Else
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 5) = 12 * 1000 * tabentgeo(nbint1, 4) / 2 / (4 / 3 * 2.65 ^
tabentgeo(nbint1, 7) + tabentgeo(nbint1, 7))
    End If
    tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 3, 10) = 0
    tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 3, 11) = 0
    tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 10) = tabentpieu(2, 1) * 1000 * tabentgeo(nbint1, 5)
    tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 11) = tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 10) /
tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 5)
    tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 5, 10) = tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 10)
    tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 5, 11) = 10 * tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 11)
    tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 2, 10) = -tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 10)
    tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 2, 11) = -tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 11)
    tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 10) = -tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 5, 10)
    tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 11) = -tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 5, 11)

```

```

        End If
    Next
    nbint1 = nbint1 + 1
Next

'Matrice de Link properties 01 - General
'Rajoute nouvelles lignes s'il y a des niveaux liés à la règle du talus
For i = 1 To nbnivpen
    tabsorlp01g(nblink + i, 1) = tabintniv(i, 4) & tabintniv(i, 3)
Next

For i = 1 To nblink + nbnivpen
    tabsorlp01g(i, 2) = "Multilinear Elastic"
    For j = 1 To 5
        tabsorlp01g(i, 2 + j) = 0
    Next
    For j = 1 To 2
        tabsorlp01g(i, 7 + j) = 1
    Next
    For j = 1 To 4
        tabsorlp01g(i, 9 + j) = 0
    Next
    tabsorlp01g(i, 14) = "Effective from Zero"
    tabsorlp01g(i, 15) = "Initial"
    tabsorlp01g(i, 16) = 1
    tabsorlp01g(i, 17) = "Red"
Next

'Matrice de Link Properties 03 - Multilinear - SAP2000+ n'offre pas l'option d'un calcul non linear, utiliser SAP2000 adv

If tabentres(1, 1) = "Longue durée" Or tabentres(1, 1) = "Courte durée" Then
For i = 1 To nblink + nbnivpen
    For j = 1 To 5
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + j, 1) = tabsorlp01g(i, 1)
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + j + 5, 1) = tabsorlp01g(i, 1)
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + j, 2) = "U2"
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + j + 5, 2) = "U3"
    Next
    For j = 1 To 2
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 3) = "No"
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 4) = "Yes"
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 7) = 0
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 9) = 0
    Next
Next
Else
For i = 1 To nblink + nbnivpen
    For j = 1 To 7
        tabsorlp03m(14 * (i - 1) + j, 1) = tabsorlp01g(i, 1)
        tabsorlp03m(14 * (i - 1) + j + 7, 1) = tabsorlp01g(i, 1)
        tabsorlp03m(14 * (i - 1) + j, 2) = "U2"
        tabsorlp03m(14 * (i - 1) + j + 7, 2) = "U3"
    Next
    For j = 1 To 2
        tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 1, 3) = "No"
        tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 1, 4) = "Yes"
        tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 1, 7) = 0
    Next
End If
End For
End If
End Sub

```

```

        tabsorlp03m(14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 1, 9) = 0
    Next
Next
End If

'----- S'il y a du talus, ceci AJOUTE les rangées de nivpente-----
If nbnivpen > 0 Then
    nbint1 = 1
    For i = 1 To nbnivpen
        While tabintniv(i, 4) <> tabentgeo(nbint1, 1)
            nbint1 = nbint1 + 1
        Wend

        For j = 1 To 2
            If tabentres(1, 1) = "Très courte durée" Then
                If tabentpieu(2, 1) >= 0.6 Then
                    tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 1, 5) = 12 * 1000 * tabentgeo(nbint1, 4) / (4 / 3
* 0.6 / tabentpieu(2, 1) * (2.65 * tabentpieu(2, 1) / 0.6) ^ tabentgeo(nbint1, 7) + tabentgeo(nbint1, 7))
                Else
                    tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 1, 5) = 12 * 1000 * tabentgeo(nbint1, 4) / (4 / 3
* 2.65 ^ tabentgeo(nbint1, 7) + tabentgeo(nbint1, 7))
                End If

                tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 4, 10) = 0
                tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 4, 11) = 0
                tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 5, 10) = tabentpieu(2, 1) * 1000 *
tabentgeo(nbint1, 5)
                tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 5, 11) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) +
7 * (j - 1) + 5, 10) / tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 1, 5)
                tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 6, 10) = tabentpieu(2, 1) * 1000 *
tabentgeo(nbint1, 6)
                tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 6, 11) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) +
7 * (j - 1) + 5, 11) + (tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 6, 10) - tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i -
1) + 7 * (j - 1) + 5, 10)) / (tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 1, 5) / 2)
                tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 7, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) +
7 * (j - 1) + 6, 10)
                tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 7, 11) = 10 * tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i -
1) + 7 * (j - 1) + 6, 11)
                tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 3, 10) = -tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) +
7 * (j - 1) + 5, 10)
                tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 3, 11) = -tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) +
7 * (j - 1) + 5, 11)
                tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 2, 10) = -tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) +
7 * (j - 1) + 6, 10)
                tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 2, 11) = -tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) +
7 * (j - 1) + 6, 11)
                tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 1, 10) = -tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) +
7 * (j - 1) + 7, 10)
                tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 7 * (j - 1) + 1, 11) = -tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) +
7 * (j - 1) + 7, 11)

            ElseIf tabentres(1, 1) = "Courte durée" Then
                If tabentpieu(2, 1) >= 0.6 Then
                    tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 5) = 12 * 1000 * tabentgeo(nbint1, 4) / (4 / 3
* 0.6 / tabentpieu(2, 1) * (2.65 * tabentpieu(2, 1) / 0.6) ^ tabentgeo(nbint1, 7) + tabentgeo(nbint1, 7))
                Else
                    tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 5) = 12 * 1000 * tabentgeo(nbint1, 4) / (4 / 3
* 2.65 ^ tabentgeo(nbint1, 7) + tabentgeo(nbint1, 7))
                End If
            End If
        Next j
    Next i
End For

```

```

End If

tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 3, 10) = 0
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 3, 11) = 0
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 10) = tabentpieu(2, 1) * 1000 *

tabentgeo(nbint1, 5)
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 11) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) +
5 * (j - 1) + 4, 10) / tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 5)
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 5, 10) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) +
5 * (j - 1) + 4, 10)
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 5, 11) = 10 * tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i -
1) + 5 * (j - 1) + 4, 11)
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 2, 10) = -tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) +
5 * (j - 1) + 4, 10)
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 2, 11) = -tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) +
5 * (j - 1) + 4, 11)
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 10) = -tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) +
5 * (j - 1) + 5, 10)
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 11) = -tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) +
5 * (j - 1) + 5, 11)

ElseIf tabentres(1, 1) = "Longue durée" Then
If tabentpieu(2, 1) >= 0.6 Then
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 5) = 12 * 1000 * tabentgeo(nbint1, 4) / 2 / (4
/ 3 * 0.6 / tabentpieu(2, 1) * (2.65 * tabentpieu(2, 1) / 0.6) ^ tabentgeo(nbint1, 7) + tabentgeo(nbint1, 7))
Else
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 5) = 12 * 1000 * tabentgeo(nbint1, 4) / 2 / (4
/ 3 * 2.65 ^ tabentgeo(nbint1, 7) + tabentgeo(nbint1, 7))
End If

tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 3, 10) = 0
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 3, 11) = 0
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 10) = tabentpieu(2, 1) * 1000 *

tabentgeo(nbint1, 5)
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 11) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) +
5 * (j - 1) + 4, 10) / tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 5)
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 5, 10) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) +
5 * (j - 1) + 4, 10)
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 5, 11) = 10 * tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i -
1) + 5 * (j - 1) + 4, 11)
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 2, 10) = -tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) +
5 * (j - 1) + 4, 10)
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 2, 11) = -tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) +
5 * (j - 1) + 4, 11)
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 10) = -tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) +
5 * (j - 1) + 5, 10)
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 11) = -tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) +
5 * (j - 1) + 5, 11)

End If

Next

If tabentres(1, 1) = "Très courte durée" Then 'MODIFICATION de valeurs déjà écrits

If tabentres(3, 1) = "X+" Then

If tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 5, 10) > tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 6, 10) *
(tabentniv(2, 1) - tabintniv(i, 3)) * tabentres(4, 1) / (5 * tabentpieu(2, 1)) Then ' Quand on n' pas dépassé la valeur r1 :
Le palier r1 est comparé avec la valeur à profondeur z1 (interpolation entre 0 et le palier r2 à 5 fois le diamètre)

```

```

        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 5, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 6, 10) *
(tabentniv(2, 1) - tabintniv(i, 3)) * tabentres(4, 1) / (5 * tabentpieu(2, 1))
        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 5, 11) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 5, 10) /
tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 1, 5)
        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 6, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 5, 10)
        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 6, 11) = 10 * tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 5, 11)
        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 7, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 5, 10)
        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 7, 11) = 10 * tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 5, 11)
    Else 'Quand on a dépassé la valeur r1
        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 5, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 5, 10)
        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 5, 11) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 5, 10) /
tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 1, 5)
        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 6, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 6, 10) *
(tabentniv(2, 1) - tabintniv(i, 3)) * tabentres(4, 1) / (5 * tabentpieu(2, 1))
        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 6, 11) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 5, 11) +
(tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 6, 10) - tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 5, 10)) / (tabsorlp03m(14 *
nblink + 14 * (i - 1) + 1, 5) / 2)
        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 7, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 6, 10)
        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 7, 11) = 10 * tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 6, 11)
    End If

    ElseIf tabentres(3, 1) = "X-" Then

        If tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 3, 10) < tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 2, 10) *
(tabentniv(2, 1) - tabintniv(i, 3)) * tabentres(4, 1) / (5 * tabentpieu(2, 1)) Then
            tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 3, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 2, 10) *
(tabentniv(2, 1) - tabintniv(i, 3)) * tabentres(4, 1) / (5 * tabentpieu(2, 1))
            tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 3, 11) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 3, 10) /
tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 1, 5)
            tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 2, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 3, 10)
            tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 2, 11) = 10 * tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 3, 11)
            tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 1, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 3, 10)
            tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 1, 11) = 10 * tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 3, 11)
        Else
            tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 3, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 3, 10)
            tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 3, 11) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 3, 10) /
tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 1, 5)
            tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 2, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 2, 10) *
(tabentniv(2, 1) - tabintniv(i, 3)) * tabentres(4, 1) / (5 * tabentpieu(2, 1))
            tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 2, 11) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 3, 11) +
(tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 2, 10) - tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 3, 10)) / (tabsorlp03m(14 *
nblink + 14 * (i - 1) + 1, 5) / 2)
            tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 1, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 2, 10)
            tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 1, 11) = 10 * tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 2, 11)
        End If

    ElseIf tabentres(3, 1) = "Y+" Then

        If tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 12, 10) > tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 13, 10) *
(tabentniv(2, 1) - tabintniv(i, 3)) * tabentres(4, 1) / (5 * tabentpieu(2, 1)) Then
            tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 12, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 13, 10) *
(tabentniv(2, 1) - tabintniv(i, 3)) * tabentres(4, 1) / (5 * tabentpieu(2, 1))
            tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 12, 11) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 12, 10) /
tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 1, 5)
            tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 13, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 12, 10)
            tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 13, 11) = 10 * tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 12, 11)
            tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 14, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 12, 10)

```

```

        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 14, 11) = 10 * tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 12, 11)
Else
    tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 12, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 12, 10)
    tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 12, 11) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 12, 10) /
tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 1, 5)
    tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 13, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 13, 10) *
(tabentniv(2, 1) - tabintniv(i, 3)) * tabentres(4, 1) / (5 * tabentpieu(2, 1))
    tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 13, 11) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 12, 11) +
(tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 13, 10) - tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 12, 10)) / (tabsorlp03m(14 *
nblink + 14 * (i - 1) + 1, 5) / 2)
    tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 14, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 13, 10)
    tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 14, 11) = 10 * tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 13, 11)
End If

Else

    If tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 10, 10) < tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 9, 10) *
(tabentniv(2, 1) - tabintniv(i, 3)) * tabentres(4, 1) / (5 * tabentpieu(2, 1)) Then
        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 10, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 9, 10) *
(tabentniv(2, 1) - tabintniv(i, 3)) * tabentres(4, 1) / (5 * tabentpieu(2, 1))
        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 10, 11) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 10, 10) /
tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 1, 5)
        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 9, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 10, 10)
        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 9, 11) = 10 * tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 10, 11)
        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 8, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 10, 10)
        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 8, 11) = 10 * tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 10, 11)
    Else
        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 10, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 10, 10)
        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 10, 11) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 10, 10) /
tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 1, 5)
        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 9, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 9, 10) *
(tabentniv(2, 1) - tabintniv(i, 3)) * tabentres(4, 1) / (5 * tabentpieu(2, 1))
        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 9, 11) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 10, 11) +
(tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 9, 10) - tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 10, 10)) / (tabsorlp03m(14 *
nblink + 14 * (i - 1) + 1, 5) / 2)
        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 8, 10) = tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 9, 10)
        tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 8, 11) = 10 * tabsorlp03m(14 * nblink + 14 * (i - 1) + 9, 11)
    End If

End If

Else

    If tabentres(3, 1) = "X+" Then
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 4, 10) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 4, 10) *
(tabentniv(2, 1) - tabintniv(i, 3)) * tabentres(4, 1) / (5 * tabentpieu(2, 1))
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 4, 11) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 4, 10) /
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 1, 5)
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5, 10) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 4, 10)
    ElseIf tabentres(3, 1) = "X-" Then
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 2, 10) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 2, 10) *
(tabentniv(2, 1) - tabintniv(i, 3)) * tabentres(4, 1) / (5 * tabentpieu(2, 1))
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 2, 11) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 2, 10) /
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 1, 5)
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 1, 10) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 2, 10)
    ElseIf tabentres(3, 1) = "Y+" Then

```

```

        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 9, 10) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 9, 10) *
(tabentniv(2, 1) - tabintniv(i, 3)) * tabentres(4, 1) / (5 * tabentpieu(2, 1))
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 9, 11) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 9, 10) /
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 1, 5)
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 10, 10) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 9, 10)
    Else
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 7, 10) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 7, 10) *
(tabentniv(2, 1) - tabintniv(i, 3)) * tabentres(4, 1) / (5 * tabentpieu(2, 1))
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 7, 11) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 7, 10) /
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 1, 5)
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 6, 10) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 7, 10)
    End If
End If

Next
End If

```

'Autres matrices

```

tabsormp01g(1, 1) = tabentpieu(5, 1)
tabsormp01g(1, 2) = "Steel"
tabsormp01g(1, 3) = tabentpieu(5, 1)
tabsormp01g(1, 4) = "Isotropic"
tabsormp01g(1, 5) = "No"
tabsormp01g(1, 6) = "Red"

tabsormp02bmp(1, 1) = tabentpieu(5, 1)
tabsormp02bmp(1, 3) = 76.973
tabsormp02bmp(1, 4) = 7.849
tabsormp02bmp(1, 5) = 210000000
tabsormp02bmp(1, 11) = 0.3
tabsormp02bmp(1, 8) = tabsormp02bmp(1, 5) / (2 * (1 + tabsormp02bmp(1, 11)))
tabsormp02bmp(1, 26) = 0.0000117

tabsormp03asd(1, 1) = tabentpieu(5, 1)
tabsormp03asd(1, 3) = Right(tabentpieu(5, 1), 3) * 1000
If Right(tabentpieu(5, 1), 3) = 450 Then
    tabsormp03asd(1, 3) = tabsormp03asd(1, 3) - 10000
End If
If Right(tabentpieu(5, 1), 3) = 235 Then
    tabsormp03asd(1, 4) = 360000
ElseIf Right(tabentpieu(5, 1), 3) = 275 Then
    tabsormp03asd(1, 4) = 430000
ElseIf Right(tabentpieu(5, 1), 3) = 355 Then
    tabsormp03asd(1, 4) = 510000
ElseIf Right(tabentpieu(5, 1), 3) = 450 Then
    tabsormp03asd(1, 4) = 550000
End If
tabsormp03asd(1, 5) = tabsormp03asd(1, 3) * 1.1
tabsormp03asd(1, 6) = tabsormp03asd(1, 4) * 1.1
tabsormp03asd(1, 7) = "Simple"
tabsormp03asd(1, 8) = "Kinematic"
tabsormp03asd(1, 9) = 0.015
tabsormp03asd(1, 10) = 0.11
tabsormp03asd(1, 11) = 0.17
tabsormp03asd(1, 12) = -0.1

```

```

'Sortir les données, les faire copier dans les feuilles correspondantes
Range(ThisWorkbook.Sheets("Connectivity - Frame").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("Connectivity - Frame").Cells(4, 4)) =
tbsorcf
Range(ThisWorkbook.Sheets("Connectivity - Link").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("Connectivity - Link").Cells(3 + nbniv,
3)) = tbsorcl
Range(ThisWorkbook.Sheets("Frame Props 01 - General").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("Frame Props 01 -
General").Cells(4, 42)) = tbsorfp01g
Range(ThisWorkbook.Sheets("Frame Section Assignements").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("Frame Section
Assignements").Cells(4, 7)) = tbsorfsa
Range(ThisWorkbook.Sheets("Joint Coordinates").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("Joint Coordinates").Cells(3 + 2 + nbniv,
8)) = tbsorcj
Range(ThisWorkbook.Sheets("Joint Restraint Assignements").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("Joint Restraint
Assignements").Cells(4, 7)) = tbsorjra
Range(ThisWorkbook.Sheets("Link Props 01 - General").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("Link Props 01 - General").Cells(3
+ nbblink + nbnivpen, 17)) = tbsorlp01g
If tabentres(1, 1) = "Très courte durée" Then
Range(ThisWorkbook.Sheets("Link Props 03 - Multilinear").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("Link Props 03 -
Multilinear").Cells(3 + 14 * (nbblink + nbnivpen), 13)) = tbsorlp03m
Else
Range(ThisWorkbook.Sheets("Link Props 03 - Multilinear").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("Link Props 03 -
Multilinear").Cells(3 + 10 * (nbblink + nbnivpen), 13)) = tbsorlp03m
End If
Range(ThisWorkbook.Sheets("Link Property Assignment").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("Link Property
Assignment").Cells(3 + nbniv, 4)) = tbsorlpa
Range(ThisWorkbook.Sheets("MatProp 01 - General").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("MatProp 01 - General").Cells(4, 6)) =
tbsormp01g
Range(ThisWorkbook.Sheets("MatProp 02 - Basic Mech Props").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("MatProp 02 - Basic Mech
Props").Cells(4, 26)) = tbsormp02bmp
Range(ThisWorkbook.Sheets("MatProp 03a - Steel Data").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("MatProp 03a - Steel
Data").Cells(4, 12)) = tbsormp03asd

Application.ScreenUpdating = True
Application.DisplayStatusBar = True
Application.Calculation = xlAutomatic

End Sub

```

## Anexo 2 : Código de la Macro de preprocesamiento de datos QSP

```

Sub QuaiSurPieu()
    Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer, m As Integer
    Dim nbX As Integer, nbY As Integer, nbcou As Integer, nbniv As Integer, nbblink As Integer, nbnivpen As Integer
    Dim nbint1 As Double, nbint2 As Double, nbint3 As Double, nbint4 As Double
    Dim dX As Double, dY As Double
    Dim inter1 As Variant, inter2 As Variant, inter3 As Variant
    Dim tabentx As Variant, tabenty As Variant, tabentniv As Variant, tabentdal As Variant, tabentpieu As Variant
    Dim tabentgeo As Variant, tabentres As Variant
    Dim tabintniv As Variant
    Dim tabsorcj As Variant, tabsorcf As Variant, tabsorjra As Variant, tabsorca As Variant, tabsoraama As Variant
    Dim tabsorasp As Variant, tabsorfp01g As Variant, tabsorfsa As Variant, tabsorlp01g As Variant, tabsorlp03m As Variant
    Dim tabsorcl As Variant, tabsorlpa As Variant, tabsormp01g As Variant, tabsormp02bmp As Variant, tabsormp03asd As Variant
    Dim tabsormp03bcd As Variant, tabsorasa As Variant
    Dim tp As String

    Application.ScreenUpdating = False
    Application.DisplayStatusBar = False
    Application.Calculation = xlManual

    nbcou = 0
    While ThisWorkbook.Sheets("Quai sur pieu").Cells(28 + nbcou, 1) <> "Neant" And nbcou < 10
        nbcou = nbcou + 1
    Wend

    If nbcou = 0 Then
        MsgBox ("Il faut rentrer au moins 1 couche")
        Exit Sub
    End If

    nbX = 0
    nbY = 0
    While ThisWorkbook.Sheets("Quai sur pieu").Cells(2, 2 + nbX) <> ""
        nbX = nbX + 1
    Wend
    While ThisWorkbook.Sheets("Quai sur pieu").Cells(6, 2 + nbY) <> ""
        nbY = nbY + 1
    Wend

    tabentx = Range(ThisWorkbook.Sheets("Quai sur pieu").Cells(2, 2), ThisWorkbook.Sheets("Quai sur pieu").Cells(3, 1 + nbX))
    tabenty = Range(ThisWorkbook.Sheets("Quai sur pieu").Cells(6, 2), ThisWorkbook.Sheets("Quai sur pieu").Cells(7, 1 + nbY))
    tabentniv = Range(ThisWorkbook.Sheets("Quai sur pieu").Cells(9, 2), ThisWorkbook.Sheets("Quai sur pieu").Cells(12, 2))
    tabentdal = Range(ThisWorkbook.Sheets("Quai sur pieu").Cells(14, 2), ThisWorkbook.Sheets("Quai sur pieu").Cells(19, 3))
    tabentpieu = Range(ThisWorkbook.Sheets("Quai sur pieu").Cells(21, 2), ThisWorkbook.Sheets("Quai sur pieu").Cells(24, 2))
    tabentgeo = Range(ThisWorkbook.Sheets("Quai sur pieu").Cells(28, 1), ThisWorkbook.Sheets("Quai sur pieu").Cells(27 +
nbcou, 7))
    tabentres = Range(ThisWorkbook.Sheets("Quai sur pieu").Cells(39, 2), ThisWorkbook.Sheets("Quai sur pieu").Cells(43, 2))

    If tabentres(1, 1) = "Très courte durée" Then
        MsgBox ("Désolé mais l'option Très courte durée n'est pas encore gérée...")
        Exit Sub
    End If

```

```

ReDim tabintniv(1 To Int(tabentniv(3, 1) - tabentniv(4, 1) + nbcou + 2), 1 To 4)

If tabentniv(1, 1) = "Tous" Then
    tabintniv(1, 1) = tabentniv(3, 1)
    nbint1 = 1
    nbint2 = 1
    Do While tabentniv(4, 1) < tabentgeo(nbint1, 3)
        If tabentgeo(nbint1, 3) < tabintniv(nbint2, 1) Then
            tabintniv(nbint2 + 1, 1) = tabentgeo(nbint1, 3)
            nbint2 = nbint2 + 1
        End If
        If nbint1 = nbcou Then
            Exit Do
        End If
        nbint1 = nbint1 + 1
    Loop
    tabintniv(nbint2 + 1, 1) = tabentniv(4, 1)
    nbint3 = 1
    For i = 1 To nbint2
        If tabintniv(i, 1) - tabintniv(i + 1, 1) <> Int(tabintniv(i, 1) - tabintniv(i + 1, 1)) Then
            tabintniv(nbint3, 2) = tabintniv(i, 1) - tabintniv(i + 1, 1) - Int(tabintniv(i, 1) - tabintniv(i + 1, 1))
            nbint3 = nbint3 + 1
        End If
        If Int(tabintniv(i, 1) - tabintniv(i + 1, 1)) <> 0 Then
            For j = 1 To Int(tabintniv(i, 1) - tabintniv(i + 1, 1))
                tabintniv(nbint3, 2) = 1
                nbint3 = nbint3 + 1
            Next
        End If
    Next
    tabintniv(1, 3) = tabentniv(3, 1) - tabintniv(1, 2) / 2
    If nbint3 <> 1 Then
        For i = 2 To nbint3 - 1
            tabintniv(i, 3) = tabintniv(i - 1, 3) - tabintniv(i - 1, 2) / 2 - tabintniv(i, 2) / 2
        Next
    End If
    For i = 1 To nbint3 - 1
        nbint4 = 1
        Do While tabintniv(i, 3) < tabentgeo(nbint4, 3)
            If nbint4 = nbcou Then
                Exit Do
            End If
            nbint4 = nbint4 + 1
        Loop
        tabintniv(i, 4) = tabentgeo(nbint4, 1)
    Next
    nbniv = nbint3 - 1
    nbink = nbint2
End If

'Regla para el talud
nbnivpen = 0
If tabentres(2, 1) = "Oui" Then
    nbint1 = max(tabentniv(3, 1) - 5 * tabentpieu(2, 1) / tabentres(4, 1), tabentres(5, 1))
    Do While tabintniv(nbnivpen + 1, 3) > nbint1
        nbnivpen = nbnivpen + 1
    End While
    If nbnivpen = nbink Then

```

```

Exit Do
End If
Loop
End If

ReDim tabsoraama(1 To 1, 1 To 17)
ReDim tabsorasa(1 To 1, 1 To 3)
ReDim tabsorasp(1 To 1, 1 To 22)
ReDim tabsorca(1 To 1, 1 To 5)
ReDim tabsorcf(1 To nbX * nbY, 1 To 4)
ReDim tabsorcl(1 To nbX * nbY * nbniv, 1 To 3)
ReDim tabsorfp01g(1 To 1, 1 To 42)
ReDim tabsorfsa(1 To nbX * nbY, 1 To 7)
ReDim tabsorjcc(1 To 2 * nbX * nbY + nbniv * nbX * nbY + 4, 1 To 8)
ReDim tabsorjra(1 To nbX * nbY, 1 To 7)
ReDim tabsorlp01g(1 To nbX * nbY + nbniv, 1 To 17)
ReDim tabsorlp03m(1 To 10 * (nbX * nbY + nbniv), 1 To 13)
ReDim tabsorlpa(1 To nbX * nbY * nbniv, 1 To 4)
ReDim tabsormp01g(1 To 2, 1 To 6)
ReDim tabsormp02bmp(1 To 2, 1 To 26)
ReDim tabsormp03asd(1 To 1, 1 To 12)
ReDim tabsormp03bcd(1 To 1, 1 To 20)

tabsorasa(1, 1) = tabentdal(1, 1)
tabsorasa(1, 2) = tabentdal(1, 1)
tabsorasa(1, 3) = "Default"

For i = 1 To 2
  If i = 1 Then
    tp = "T"
  Else
    tp = "P"
  End If
  dX = 0
  For j = 1 To nbX
    dX = dX + tabentx(2, j)
    dY = 0
    For k = 1 To nbY
      tabsorjcc(nbX * nbY * (i - 1) + nbY * (j - 1) + k, 1) = tabentx(1, j) & tabenty(1, k) & tp
      tabsorjcc(nbX * nbY * (i - 1) + nbY * (j - 1) + k, 2) = "GLOBAL"
      tabsorjcc(nbX * nbY * (i - 1) + nbY * (j - 1) + k, 3) = "Cartesian"
      dY = dY + tabenty(2, k)
      tabsorjcc(nbX * nbY * (i - 1) + nbY * (j - 1) + k, 4) = dX
      tabsorjcc(nbX * nbY * (i - 1) + nbY * (j - 1) + k, 5) = dY
      tabsorjcc(nbX * nbY * (i - 1) + nbY * (j - 1) + k, 8) = "Yes"
    Next
  Next
Next

If tabentniv(1, 1) = "Tous" Then
  For i = 1 To nbX
    For j = 1 To nbY
      tabsorjcc(nbX * nbY * (i - 1) + j, 7) = tabentniv(2, 1)
      tabsorjcc(nbX * nbY + nbY * (i - 1) + j, 7) = tabentniv(4, 1)
    Next
  Next

```

```

Next
End If

For i = 1 To nbniv
  dX = 0
  For j = 1 To nbX
    dX = dX + tabentx(2, j)
    dY = 0
    For k = 1 To nbY
      tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbX * nbY * (i - 1) + nbY * (j - 1) + k, 1) = tabentx(1, j) & tabenty(1, k) &
tabintniv(i, 3)
      tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbX * nbY * (i - 1) + nbY * (j - 1) + k, 2) = "GLOBAL"
      tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbX * nbY * (i - 1) + nbY * (j - 1) + k, 3) = "Cartesian"
      dY = dY + tabenty(2, k)
      tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbX * nbY * (i - 1) + nbY * (j - 1) + k, 4) = dX
      tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbX * nbY * (i - 1) + nbY * (j - 1) + k, 5) = dY
      tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbX * nbY * (i - 1) + nbY * (j - 1) + k, 7) = tabintniv(i, 3)
      tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbX * nbY * (i - 1) + nbY * (j - 1) + k, 8) = "Yes"
    Next
  Next
Next

For i = 1 To 4
  tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbniv * nbX * nbY + i, 2) = "GLOBAL"
  tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbniv * nbX * nbY + i, 3) = "Cartesian"
  tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbniv * nbX * nbY + i, 7) = tabentniv(2, 1)
  tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbniv * nbX * nbY + i, 8) = "Yes"
Next

tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbniv * nbX * nbY + 1, 1) = tabentx(1, 1) & "-" & tabenty(1, 1) & "-"
tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbniv * nbX * nbY + 1, 4) = 0
tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbniv * nbX * nbY + 1, 5) = 0
tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbniv * nbX * nbY + 2, 1) = tabentx(1, nbX) & "+" & tabenty(1, 1) & "-"
tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbniv * nbX * nbY + 2, 4) = dX + tabentdal(2, 1)
tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbniv * nbX * nbY + 2, 5) = 0
tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbniv * nbX * nbY + 3, 1) = tabentx(1, 1) & "-" & tabenty(1, nbY) & "+"
tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbniv * nbX * nbY + 3, 4) = 0
tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbniv * nbX * nbY + 3, 5) = dY + tabentdal(3, 1)
tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbniv * nbX * nbY + 4, 1) = tabentx(1, nbX) & "+" & tabenty(1, nbY) & "+"
tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbniv * nbX * nbY + 4, 4) = dX + tabentdal(2, 1)
tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbniv * nbX * nbY + 4, 5) = dY + tabentdal(3, 1)

If tabentpieu(1, 1) = "Pipe" Then
  inter1 = tabentpieu(2, 1) * 1000
  inter2 = tabentpieu(3, 1) * 1000
  inter3 = tabentpieu(4, 1)
  tabsorfp01g(1, 1) = inter1 & " ep." & inter2 & " " & inter3
  tabsorfp01g(1, 2) = tabentpieu(4, 1)
  tabsorfp01g(1, 3) = "Pipe"
  tabsorfp01g(1, 5) = tabentpieu(2, 1)
  tabsorfp01g(1, 8) = tabentpieu(3, 1)
End If

For i = 1 To nbX
  For j = 1 To nbY
    tabsorcf(nbY * (i - 1) + j, 1) = tabentx(1, i) & tabenty(1, j)
    tabsorcf(nbY * (i - 1) + j, 2) = tabentx(1, i) & tabenty(1, j) & "T"
    tabsorcf(nbY * (i - 1) + j, 3) = tabentx(1, i) & tabenty(1, j) & "P"
  Next
Next

```

```

    tabsorcfc(nbY * (i - 1) + j, 4) = "No"
    tabsorjra(nbY * (i - 1) + j, 1) = tabentx(1, i) & tabenty(1, j) & "P"
    tabsorjra(nbY * (i - 1) + j, 2) = "No"
    tabsorjra(nbY * (i - 1) + j, 3) = "No"
    tabsorjra(nbY * (i - 1) + j, 4) = "Yes"
    tabsorjra(nbY * (i - 1) + j, 5) = "No"
    tabsorjra(nbY * (i - 1) + j, 6) = "No"
    tabsorjra(nbY * (i - 1) + j, 7) = "No"
    tabsorfsa(nbY * (i - 1) + j, 1) = tabsorcfc(nbY * (i - 1) + j, 1)
    tabsorfsa(nbY * (i - 1) + j, 2) = "N.A."
    tabsorfsa(nbY * (i - 1) + j, 3) = tabsorfp01g(1, 1)
    tabsorfsa(nbY * (i - 1) + j, 4) = "Default"

```

Next

Next

```

    tabsorca(1, 1) = tabentdal(1, 1)
    tabsorca(1, 2) = tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbniv * nbX * nbY + 1, 1)
    tabsorca(1, 3) = tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbniv * nbX * nbY + 2, 1)
    tabsorca(1, 4) = tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbniv * nbX * nbY + 4, 1)
    tabsorca(1, 5) = tabsorjrc(2 * nbX * nbY + nbniv * nbX * nbY + 3, 1)

```

```

    tabsoraama(1, 1) = tabentdal(1, 1)
    tabsoraama(1, 2) = "Cookie Cut Points"
    tabsoraama(1, 3) = "ALL"
    tabsoraama(1, 10) = 0
    tabsoraama(1, 12) = "No"
    tabsoraama(1, 13) = "No"
    tabsoraama(1, 14) = "No"
    tabsoraama(1, 15) = "No"

```

If tabentdal(6, 1) = "Oui" Then

    tabsoraama(1, 16) = "Yes"

    tabsoraama(1, 17) = tabentdal(6, 2)

Else

    tabsoraama(1, 16) = "No"

End If

```

    tabsorasp(1, 1) = tabentdal(1, 1)
    tabsorasp(1, 2) = tabentdal(4, 1)
    tabsorasp(1, 3) = 0
    tabsorasp(1, 4) = "Shell"
    tabsorasp(1, 5) = "Shell-Thin"
    tabsorasp(1, 6) = "Yes"
    tabsorasp(1, 7) = tabentdal(5, 1)
    tabsorasp(1, 8) = tabentdal(5, 1)
    tabsorasp(1, 12) = "Red"

```

For i = 1 To 10

    tabsorasp(1, 12 + i) = 1

Next

For i = 1 To nbX

    For j = 1 To nbY

        For k = 1 To nbniv

            For m = 1 To 3

                tabсорl((i - 1) \* nbY \* nbniv + (j - 1) \* nbniv + k, m) = tabentx(1, i) & tabenty(1, j) & tabintniv(k,

3)

            Next

                tabсорlpa((i - 1) \* nbY \* nbniv + (j - 1) \* nbniv + k, 1) = tabentx(1, i) & tabenty(1, j) & tabintniv(k, 3)

```

    If k <= nbnivpen Then
        tabsorlpa((i - 1) * nbY * nbniv + (j - 1) * nbniv + k, 2) = tabintniv(k, 4) & tabintniv(k, 3)
    Else
        tabsorlpa((i - 1) * nbY * nbniv + (j - 1) * nbniv + k, 2) = tabintniv(k, 4)
    End If
    tabsorlpa((i - 1) * nbY * nbniv + (j - 1) * nbniv + k, 3) = "None"
    tabsorlpa((i - 1) * nbY * nbniv + (j - 1) * nbniv + k, 4) = tabintniv(k, 2) * max(0, min(1, 0.5 +
(tabentniv(3, 1) - tabintniv(k, 3)) / (8 * tabentpieu(2, 1))))
Next
Next
Next

nbint1 = 1
For i = 1 To nblink
    While tabentgeo(nbint1, 2) <= tabentniv(4, 1) Or tabentgeo(nbint1, 3) >= tabentniv(3, 1)
        nbint1 = nbint1 + 1
    Wend
    tabsorlp01g(i, 1) = tabentgeo(nbint1, 1)
    For j = 1 To 2
        If tabentpieu(2, 1) >= 0.6 Then
            tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 5) = 12 * 1000 * tabentgeo(nbint1, 4) / (4 / 3 * 0.6 /
tabentpieu(2, 1) * (2.65 * tabentpieu(2, 1) / 0.6) ^ tabentgeo(nbint1, 7) + tabentgeo(nbint1, 7))
        Else
            tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 5) = 12 * 1000 * tabentgeo(nbint1, 4) / (4 / 3 * 2.65 ^
tabentgeo(nbint1, 7) + tabentgeo(nbint1, 7))
        End If
        If tabentres(1, 1) = "Longue durée" Then
            tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 5) = tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 5) / 2
        End If
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 3, 10) = 0
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 3, 11) = 0
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 10) = tabentpieu(2, 1) * 1000 * tabentgeo(nbint1, 5)
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 11) = tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 10) /
tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 5)
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 5, 10) = tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 10)
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 5, 11) = 10 * tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 11)
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 2, 10) = -tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 10)
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 2, 11) = -tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 11)
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 10) = -tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 5, 10)
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 11) = -tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 5, 11)
    Next
    nbint1 = nbint1 + 1
Next

For i = 1 To nbnivpen
    tabsorlp01g(nblink + i, 1) = tabintniv(i, 4) & tabintniv(i, 3)
Next

For i = 1 To nblink + nbnivpen
    tabsorlp01g(i, 2) = "MultiLinear Elastic"
    For j = 1 To 5
        tabsorlp01g(i, 2 + j) = 0
    Next
    For j = 1 To 2
        tabsorlp01g(i, 7 + j) = 1
    Next

```

```

Next
For j = 1 To 4
    tabsorlp01g(i, 9 + j) = 0
Next
tabsorlp01g(i, 14) = "Effective from Zero"
tabsorlp01g(i, 15) = "Initial"
tabsorlp01g(i, 16) = 1
tabsorlp01g(i, 17) = "Red"
Next

For i = 1 To nblink + nbnivpen
    For j = 1 To 5
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + j, 1) = tabsorlp01g(i, 1)
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + j + 5, 1) = tabsorlp01g(i, 1)
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + j, 2) = "U2"
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + j + 5, 2) = "U3"
    Next
    For j = 1 To 2
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 3) = "No"
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 4) = "Yes"
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 7) = 0
        tabsorlp03m(10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 9) = 0
    Next
Next

If nbnivpen > 0 Then
    nbint1 = 1
    For i = 1 To nbnivpen
        While tabintniv(i, 4) <> tabentgeo(nbint1, 1)
            nbint1 = nbint1 + 1
        Wend
        For j = 1 To 2
            If tabentpieu(2, 1) >= 0.6 Then
                tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 5) = 12 * 1000 * tabentgeo(nbint1, 4) / (4 / 3
* 0.6 / tabentpieu(2, 1) * (2.65 * tabentpieu(2, 1) / 0.6) ^ tabentgeo(nbint1, 7) + tabentgeo(nbint1, 7))
            Else
                tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 5) = 12 * 1000 * tabentgeo(nbint1, 4) / (4 / 3
* 2.65 ^ tabentgeo(nbint1, 7) + tabentgeo(nbint1, 7))
            End If
            If tabentres(1, 1) = "Longue durée" Then
                tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 5) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5
* (j - 1) + 1, 5) / 2
            End If
            tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 3, 10) = 0
            tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 3, 11) = 0
            tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 10) = tabentpieu(2, 1) * 1000 * tabentgeo(nbint1,
5)
            tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 4, 11) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 *
(j - 1) + 4, 10) / tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 5)
            tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 5, 10) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 *
(j - 1) + 4, 10)
            tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 5, 11) = 10 * tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) +
5 * (j - 1) + 4, 11)
            tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 2, 10) = -tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 *
(j - 1) + 4, 10)
            tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 2, 11) = -tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 *
(j - 1) + 4, 11)

```

```

        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 10) = -tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 *
(j - 1) + 5, 10)
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 * (j - 1) + 1, 11) = -tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5 *
(j - 1) + 5, 11)
    Next
    If tabentres(3, 1) = "X+" Then
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 4, 10) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 4, 10) *
(tabentniv(3, 1) - tabintniv(i, 3)) * tabentres(4, 1) / (5 * tabentpieu(2, 1))
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 4, 11) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 4, 10) /
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 1, 5)
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 5, 10) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 4, 10)
    ElseIf tabentres(3, 1) = "X-" Then
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 2, 10) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 2, 10) *
(tabentniv(3, 1) - tabintniv(i, 3)) * tabentres(4, 1) / (5 * tabentpieu(2, 1))
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 2, 11) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 2, 10) /
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 1, 5)
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 1, 10) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 2, 10)
    ElseIf tabentres(3, 1) = "Y+" Then
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 9, 10) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 9, 10) *
(tabentniv(3, 1) - tabintniv(i, 3)) * tabentres(4, 1) / (5 * tabentpieu(2, 1))
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 9, 11) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 9, 10) /
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 1, 5)
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 10, 10) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 9, 10)
    Else
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 7, 10) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 7, 10) *
(tabentniv(3, 1) - tabintniv(i, 3)) * tabentres(4, 1) / (5 * tabentpieu(2, 1))
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 7, 11) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 7, 10) /
tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 1, 5)
        tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 6, 10) = tabsorlp03m(10 * nblink + 10 * (i - 1) + 7, 10)
    End If
Next
End If

tabsormp01g(1, 1) = tabentdal(4, 1)
tabsormp01g(1, 2) = "Concrete"
tabsormp01g(1, 3) = tabentdal(4, 1)
tabsormp01g(1, 4) = "Isotropic"
tabsormp01g(1, 5) = "No"
tabsormp01g(1, 6) = "Red"
tabsormp01g(2, 1) = tabentpieu(4, 1)
tabsormp01g(2, 2) = "Steel"
tabsormp01g(2, 3) = tabentpieu(4, 1)
tabsormp01g(2, 4) = "Isotropic"
tabsormp01g(2, 5) = "No"
tabsormp01g(2, 6) = "Red"

tabsormp02bmp(1, 1) = tabentdal(4, 1)
tabsormp02bmp(2, 1) = tabentpieu(4, 1)
tabsormp02bmp(1, 3) = 24.993
tabsormp02bmp(2, 3) = 76.973
tabsormp02bmp(1, 4) = 2.5485
tabsormp02bmp(2, 4) = 7.849
tabsormp02bmp(1, 5) = Int(22 * ((Right(Left(tabentdal(4, 1), 3), 2) + 8) / 10) ^ 0.3) * 10 ^ 6)
tabsormp02bmp(2, 5) = 210000000
tabsormp02bmp(1, 11) = 0.2
tabsormp02bmp(2, 11) = 0.3
tabsormp02bmp(1, 8) = tabsormp02bmp(1, 5) / (2 * (1 + tabsormp02bmp(1, 11)))

```

```

tabsormp02bmp(2, 8) = tabsormp02bmp(2, 5) / (2 * (1 + tabsormp02bmp(2, 11)))
tabsormp02bmp(1, 26) = 0.00001
tabsormp02bmp(2, 26) = 0.0000117

tabsormp03asd(1, 1) = tabentpieu(4, 1)
tabsormp03asd(1, 3) = Right(tabentpieu(4, 1), 3) * 1000
If Right(tabentpieu(4, 1), 3) = 450 Then
    tabsormp03asd(1, 3) = tabsormp03asd(1, 3) - 10000
End If
If Right(tabentpieu(4, 1), 3) = 235 Then
    tabsormp03asd(1, 4) = 360000
ElseIf Right(tabentpieu(4, 1), 3) = 275 Then
    tabsormp03asd(1, 4) = 430000
ElseIf Right(tabentpieu(4, 1), 3) = 355 Then
    tabsormp03asd(1, 4) = 510000
ElseIf Right(tabentpieu(4, 1), 3) = 450 Then
    tabsormp03asd(1, 4) = 550000
End If
tabsormp03asd(1, 5) = tabsormp03asd(1, 3) * 1.1
tabsormp03asd(1, 6) = tabsormp03asd(1, 4) * 1.1
tabsormp03asd(1, 7) = "Simple"
tabsormp03asd(1, 8) = "Kinematic"
tabsormp03asd(1, 9) = 0.015
tabsormp03asd(1, 10) = 0.11
tabsormp03asd(1, 11) = 0.17
tabsormp03asd(1, 12) = -0.1

tabsormp03bcd(1, 1) = tabentdal(4, 1)
tabsormp03bcd(1, 3) = Right(Left(tabentdal(4, 1), 3), 2) * 10 ^ 3
tabsormp03bcd(1, 4) = tabsormp03bcd(1, 3)
tabsormp03bcd(1, 5) = "No"
tabsormp03bcd(1, 7) = "Mander"
tabsormp03bcd(1, 8) = "Takeda"
If Right(Left(tabentdal(4, 1), 3), 2) = 20 Then
    tabsormp03bcd(1, 9) = 0.001333
ElseIf Right(Left(tabentdal(4, 1), 3), 2) = 25 Then
    tabsormp03bcd(1, 9) = 0.001613
ElseIf Right(Left(tabentdal(4, 1), 3), 2) = 30 Then
    tabsormp03bcd(1, 9) = 0.001818
ElseIf Right(Left(tabentdal(4, 1), 3), 2) = 35 Then
    tabsormp03bcd(1, 9) = 0.002059
ElseIf Right(Left(tabentdal(4, 1), 3), 2) = 40 Then
    tabsormp03bcd(1, 9) = 0.002286
ElseIf Right(Left(tabentdal(4, 1), 3), 2) = 45 Then
    tabsormp03bcd(1, 9) = 0.0025
ElseIf Right(Left(tabentdal(4, 1), 3), 2) = 50 Then
    tabsormp03bcd(1, 9) = 0.002703
End If
tabsormp03bcd(1, 10) = 0.005
tabsormp03bcd(1, 11) = -0.1
tabsormp03bcd(1, 12) = 0
tabsormp03bcd(1, 13) = 0
For i = 1 To 3
    tabsormp03bcd(1, 12 + 2 * i) = "No"
    tabsormp03bcd(1, 13 + 2 * i) = 1
Next
tabsormp03bcd(1, 20) = "Full Integration"

```

```

Range(ThisWorkbook.Sheets("Area Auto Mesh Assignments").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("Area Auto Mesh
Assignments").Cells(4, 17)) = tabsoraama
Range(ThisWorkbook.Sheets("Area Section Assignments").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("Area Section
Assignments").Cells(4, 3)) = tabsorasa
Range(ThisWorkbook.Sheets("Area Section Properties").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("Area Section Properties").Cells(4,
22)) = tabsorasp
Range(ThisWorkbook.Sheets("Connectivity - Area").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("Connectivity - Area").Cells(4, 5)) =
tabsorca
Range(ThisWorkbook.Sheets("Connectivity - Frame").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("Connectivity - Frame").Cells(3 + nbX
* nbY, 4)) = tabsorcfcf
Range(ThisWorkbook.Sheets("Connectivity - Link").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("Connectivity - Link").Cells(3 + nbX *
nbY * nbniv, 3)) = tabsorcl
Range(ThisWorkbook.Sheets("Frame Props 01 - General").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("Frame Props 01 -
General").Cells(4, 42)) = tabsorfp01g
Range(ThisWorkbook.Sheets("Frame Section Assignments").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("Frame Section
Assignments").Cells(3 + nbX * nbY, 7)) = tabsorfsa
Range(ThisWorkbook.Sheets("Joint Coordinates").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("Joint Coordinates").Cells(3 + 2 * nbX *
nbY + nbniv * nbX * nbY + 4, 8)) = tabsorjc
Range(ThisWorkbook.Sheets("Joint Restraint Assignments").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("Joint Restraint
Assignments").Cells(3 + nbX * nbY, 7)) = tabsorjra
Range(ThisWorkbook.Sheets("Link Props 01 - General").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("Link Props 01 - General").Cells(3
+ nbLink + nbnivpen, 17)) = tabsorlp01g
Range(ThisWorkbook.Sheets("Link Props 03 - Multilinear").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("Link Props 03 -
Multilinear").Cells(3 + 10 * (nbLink + nbnivpen), 13)) = tabsorlp03m
Range(ThisWorkbook.Sheets("Link Property Assignment").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("Link Property
Assignment").Cells(3 + nbX * nbY * nbniv, 4)) = tabsorlpa
Range(ThisWorkbook.Sheets("MatProp 01 - General").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("MatProp 01 - General").Cells(5, 6)) =
tabsormp01g
Range(ThisWorkbook.Sheets("MatProp 02 - Basic Mech Props").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("MatProp 02 - Basic Mech
Props").Cells(5, 26)) = tabsormp02bmp
Range(ThisWorkbook.Sheets("MatProp 03a - Steel Data").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("MatProp 03a - Steel
Data").Cells(4, 12)) = tabsormp03asd
Range(ThisWorkbook.Sheets("MatProp 03b - Concrete Data").Cells(4, 1), ThisWorkbook.Sheets("MatProp 03b - Concrete
Data").Cells(4, 20)) = tabsormp03bcd

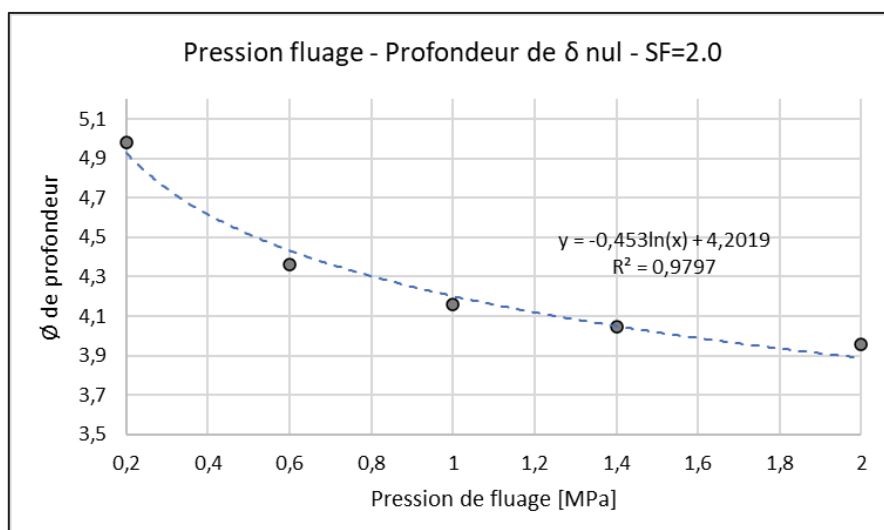
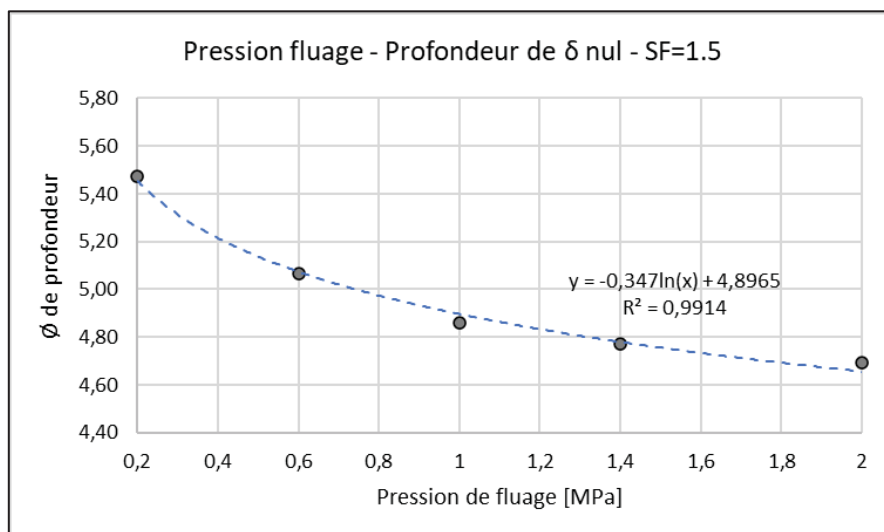
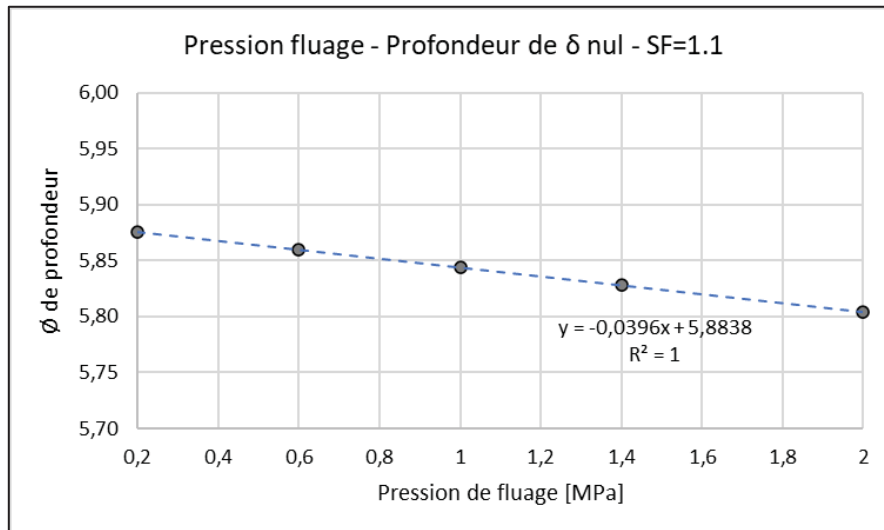
Application.ScreenUpdating = True
Application.DisplayStatusBar = True
Application.Calculation = xlAutomatic

End Sub

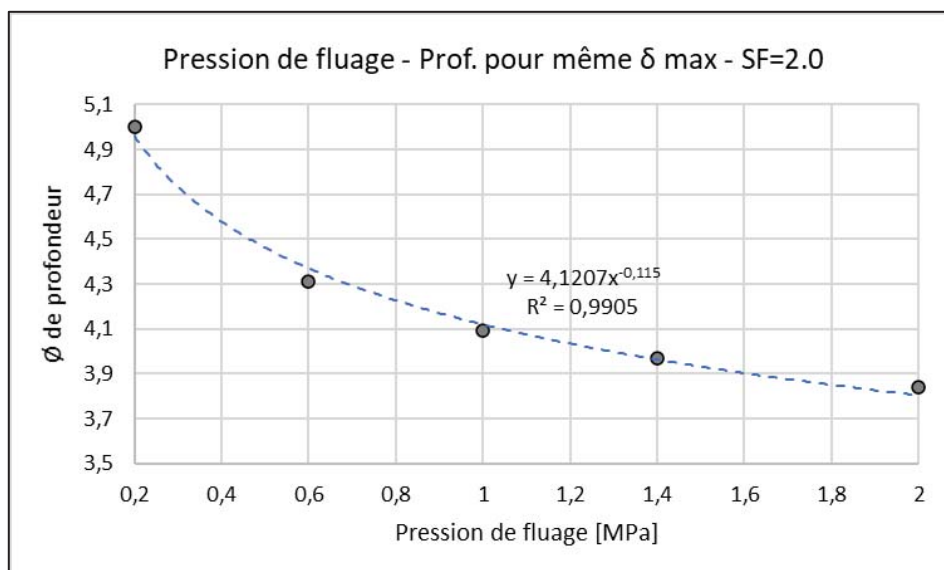
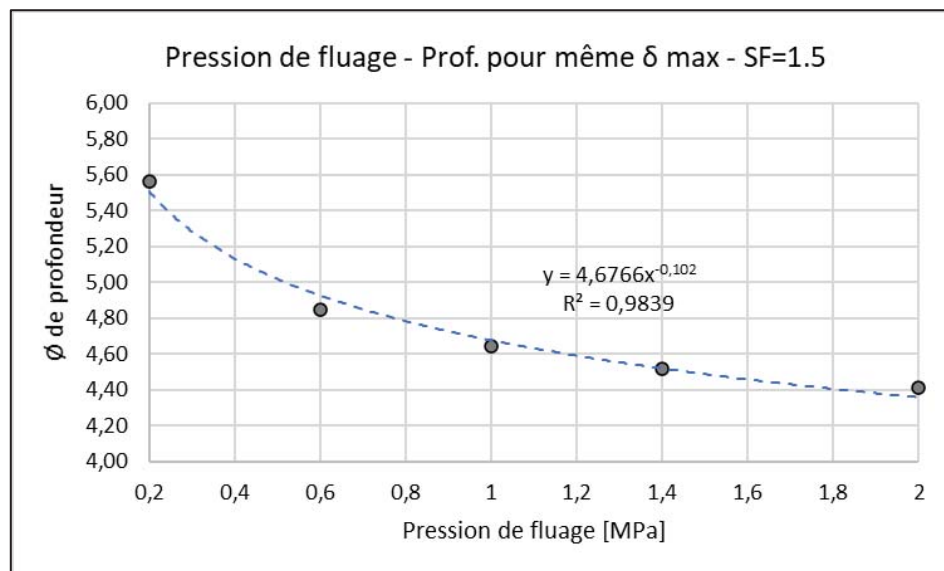
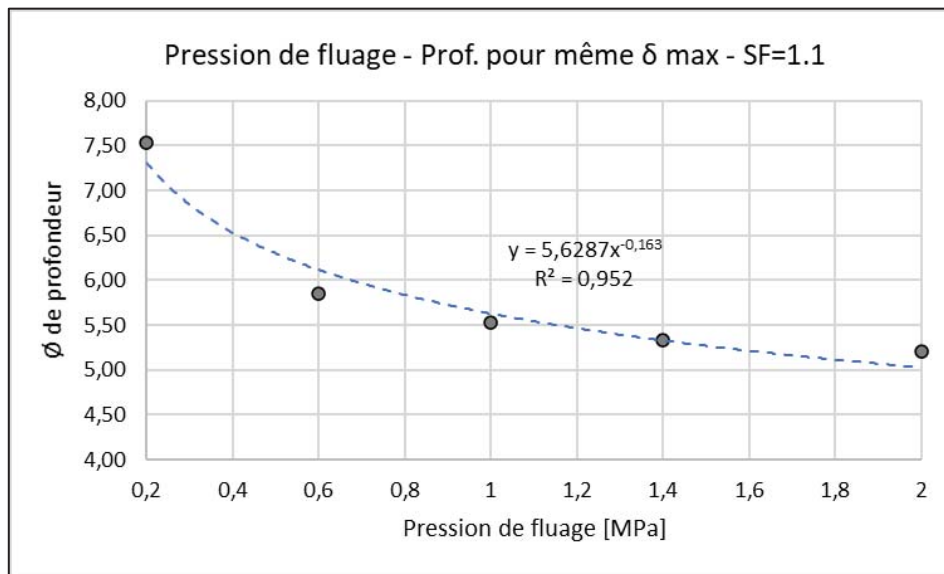
```

## Anexo 3: Zoom sobre las gráficas de profundidades equivalentes

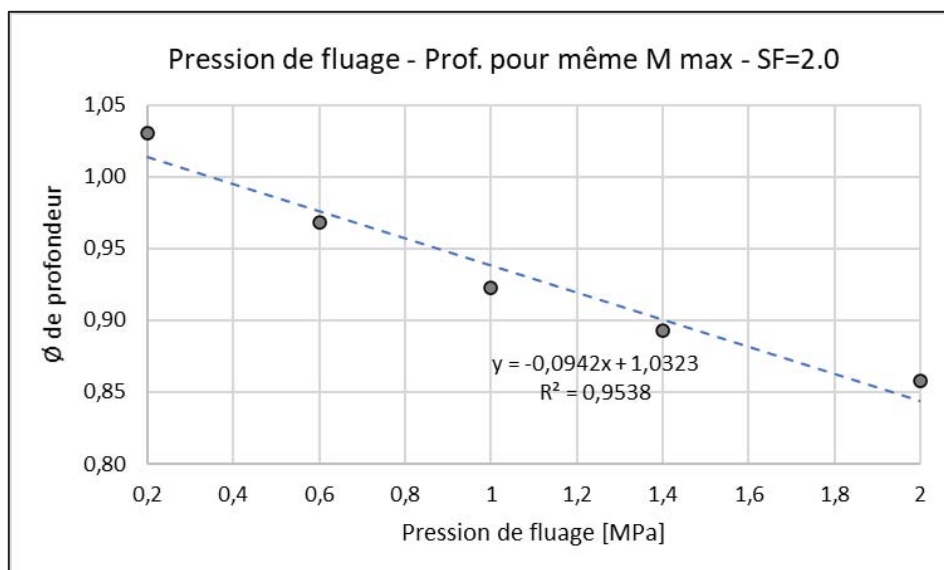
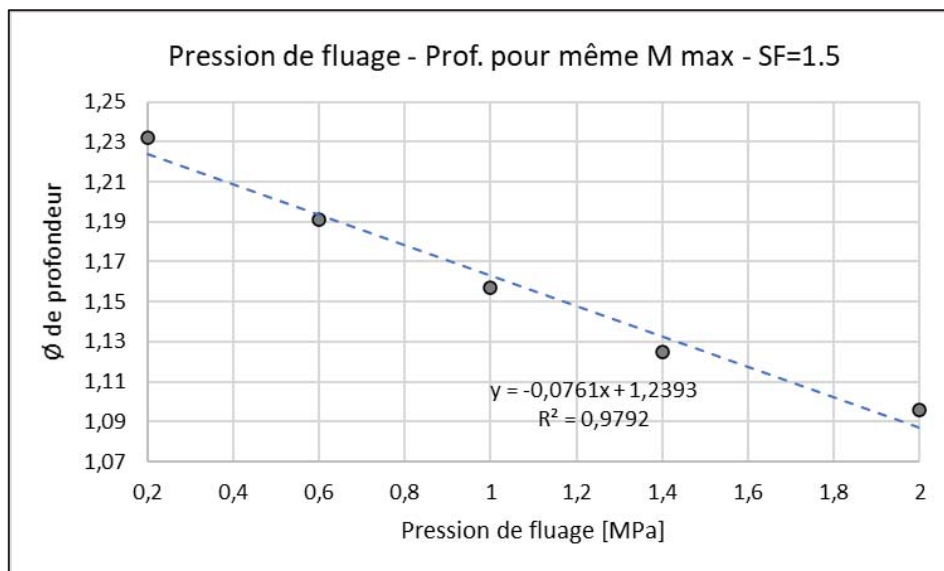
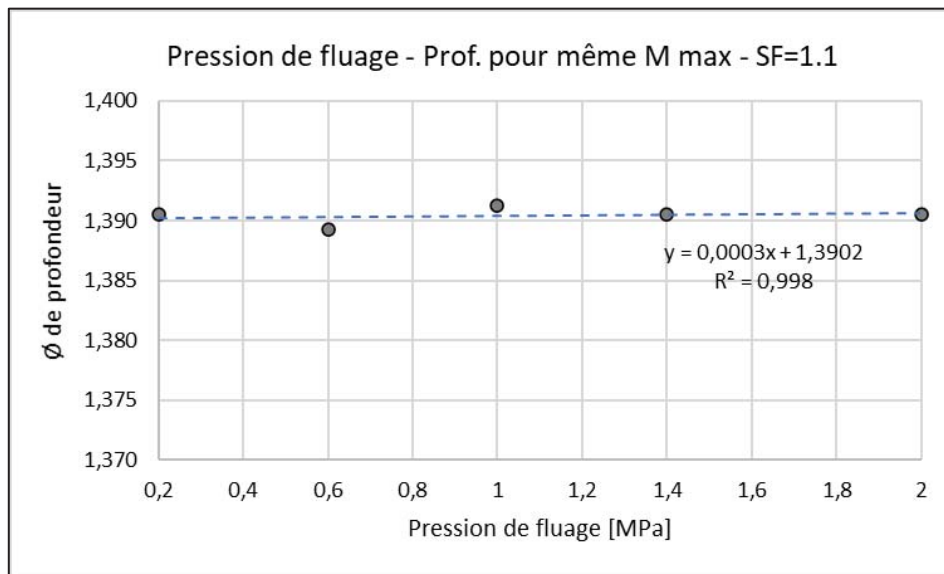
Influencia de la rigidez del suelo y el cociente de empuje pasivo sobre la prof de empotram.



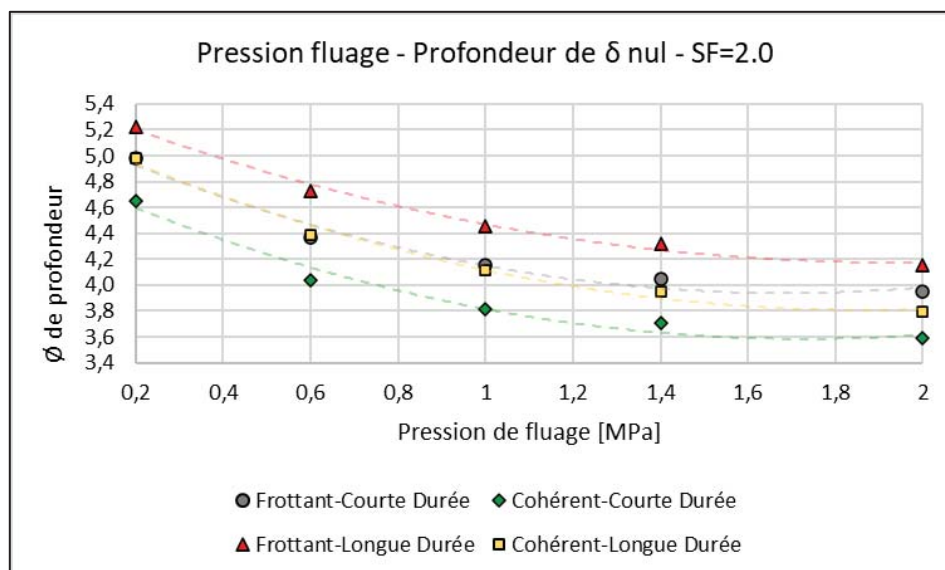
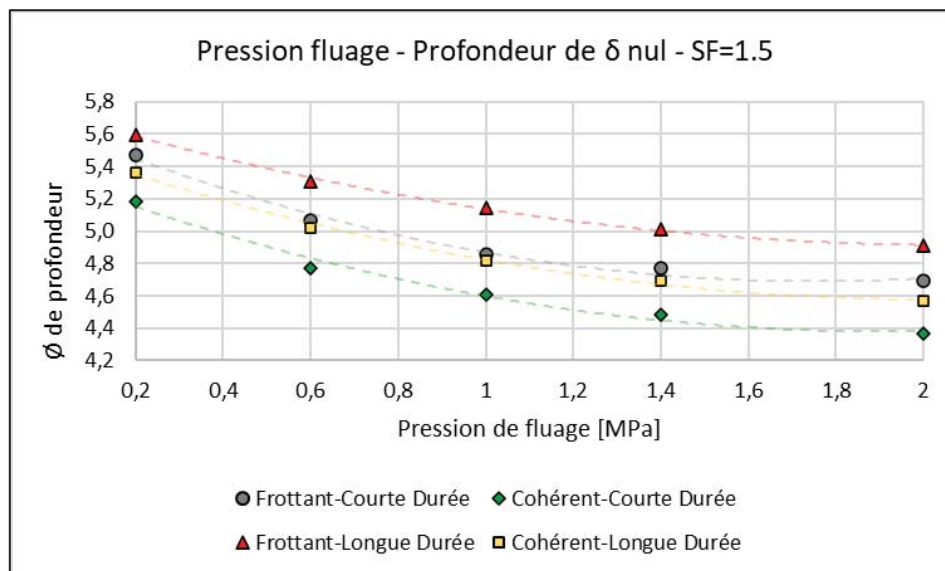
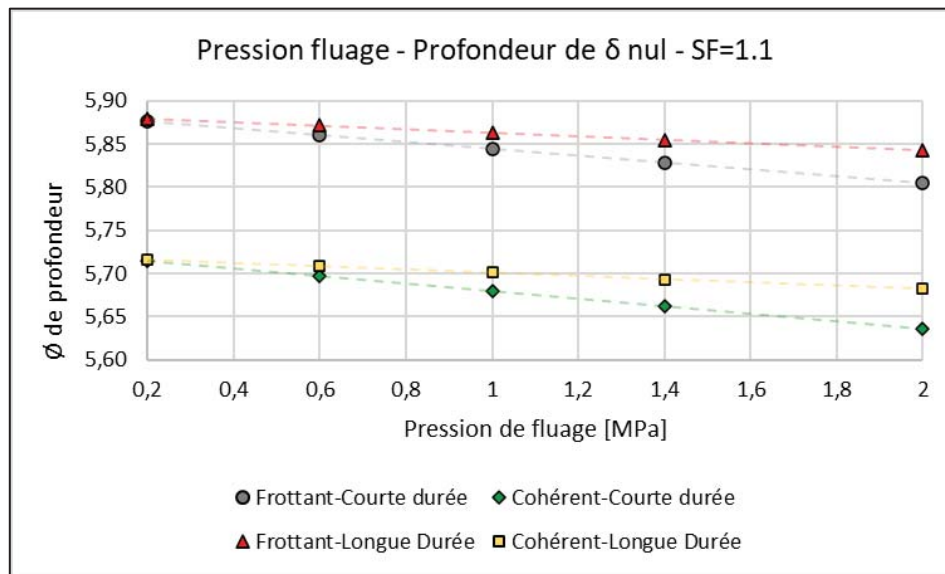
## Influencia de rigidez del suelo y del cociente de empuje pasivo sobre prof para despl max



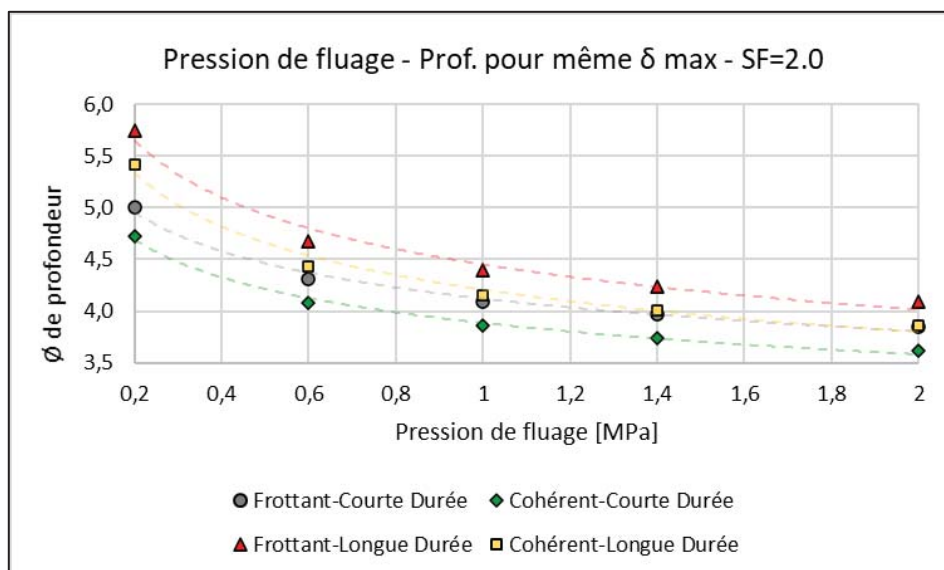
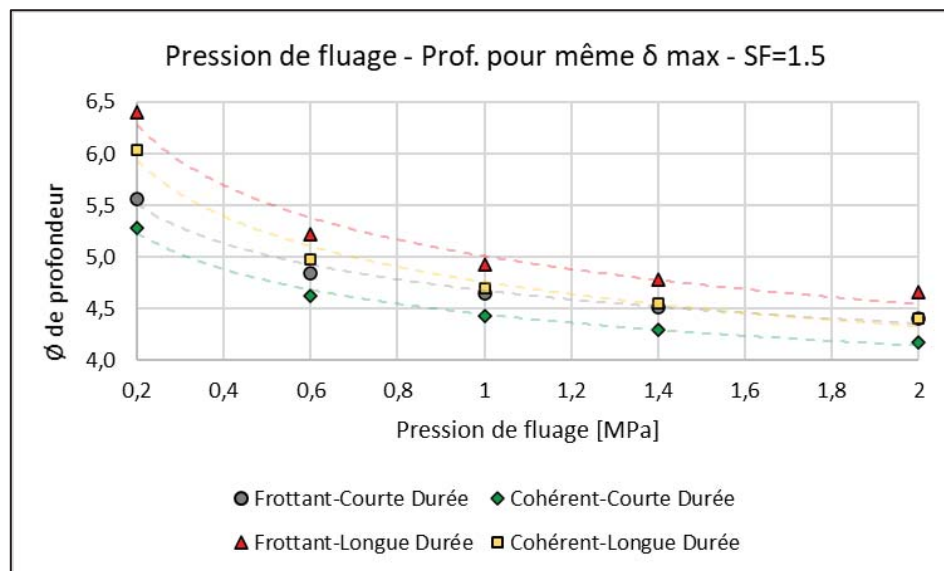
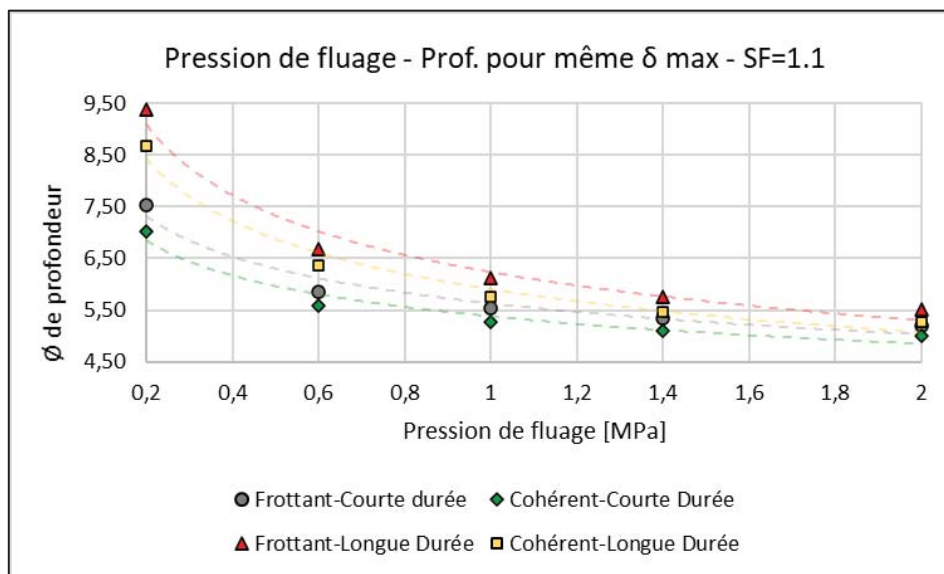
## Influencia de rigidez del suelo y del cociente de empuje pasivo sobre prof para mom max



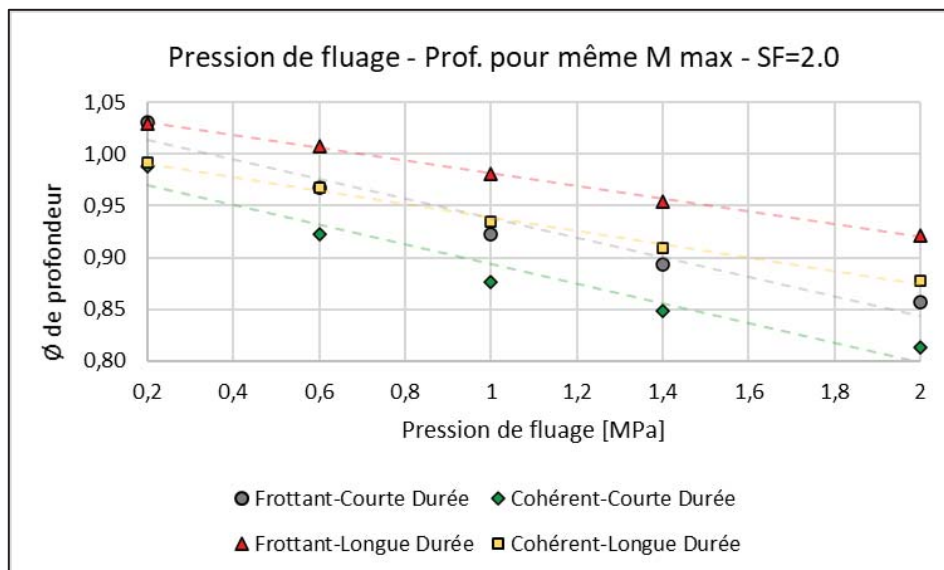
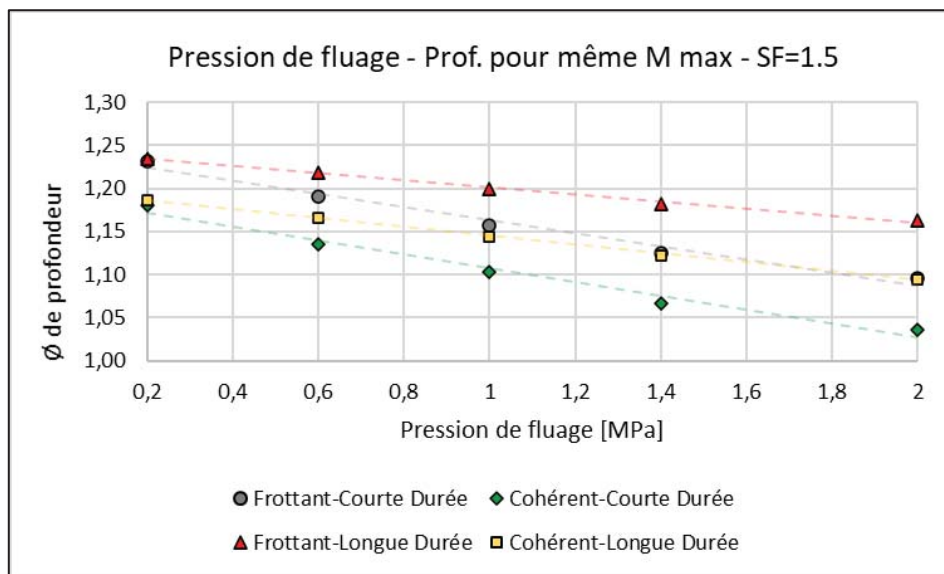
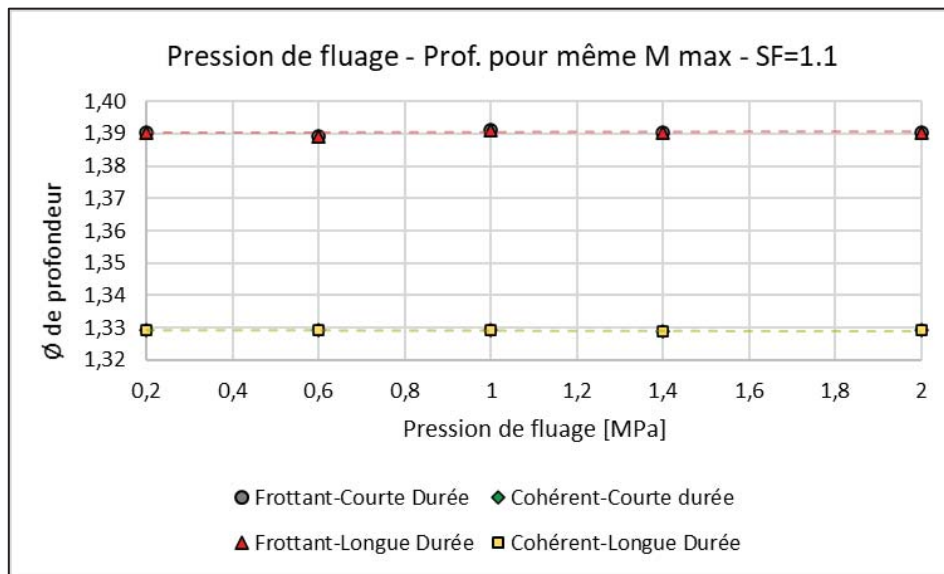
## Influencia de la duración de la carga y tipo de suelo sobre la prof de empotramiento



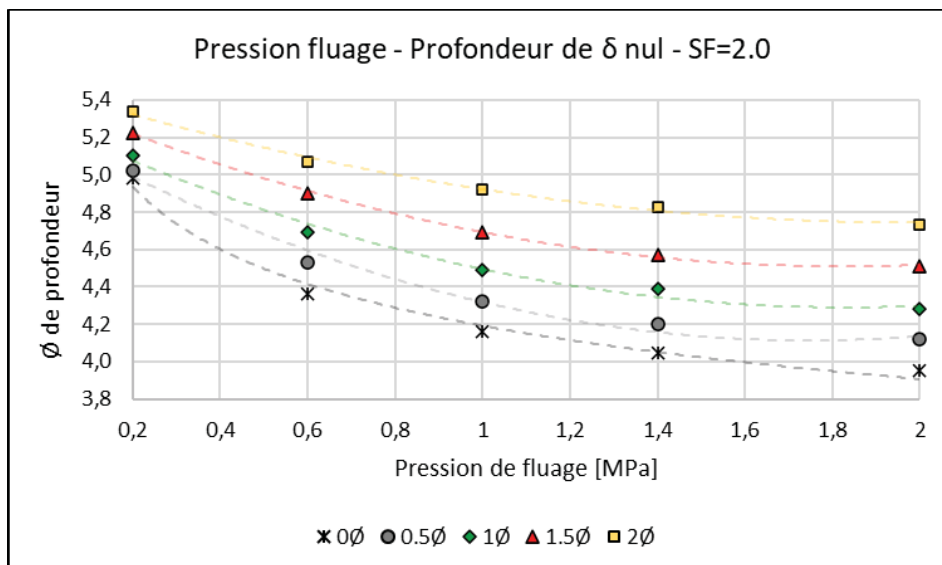
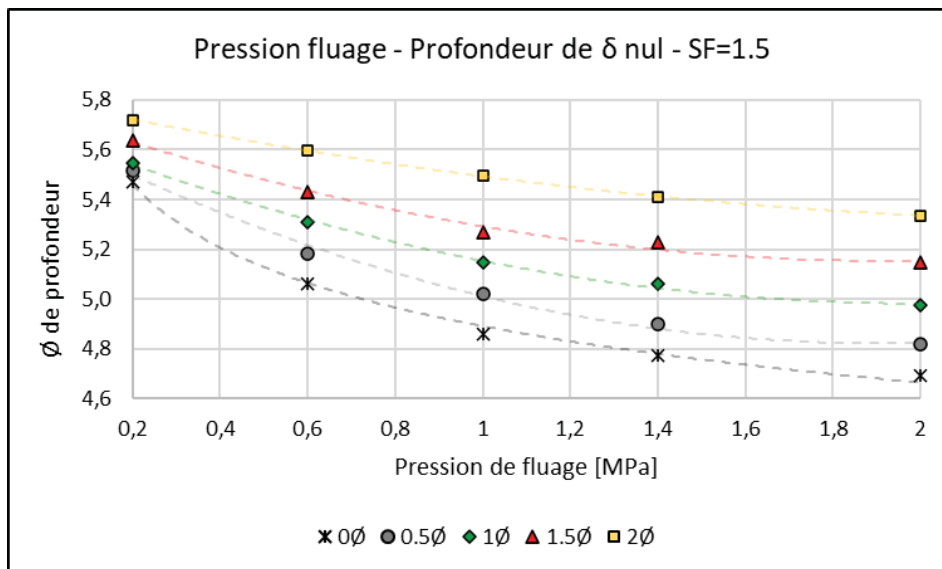
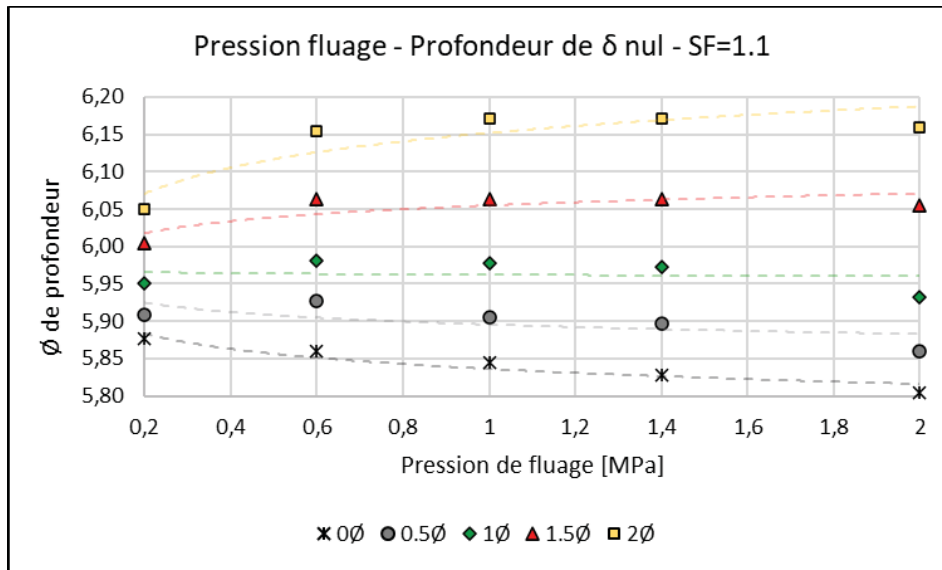
## Influencia de la duración de la carga y tipo de suelo sobre la prof para desplaz max



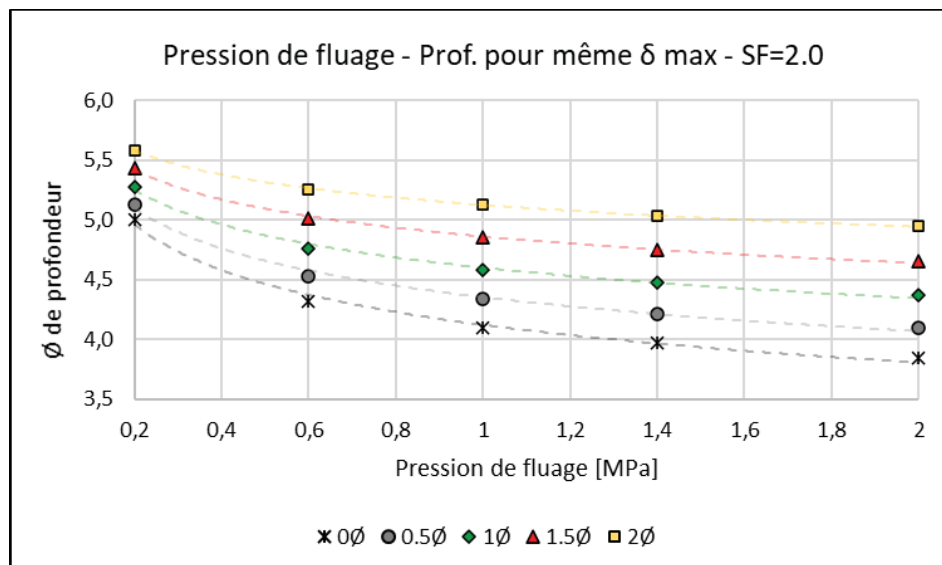
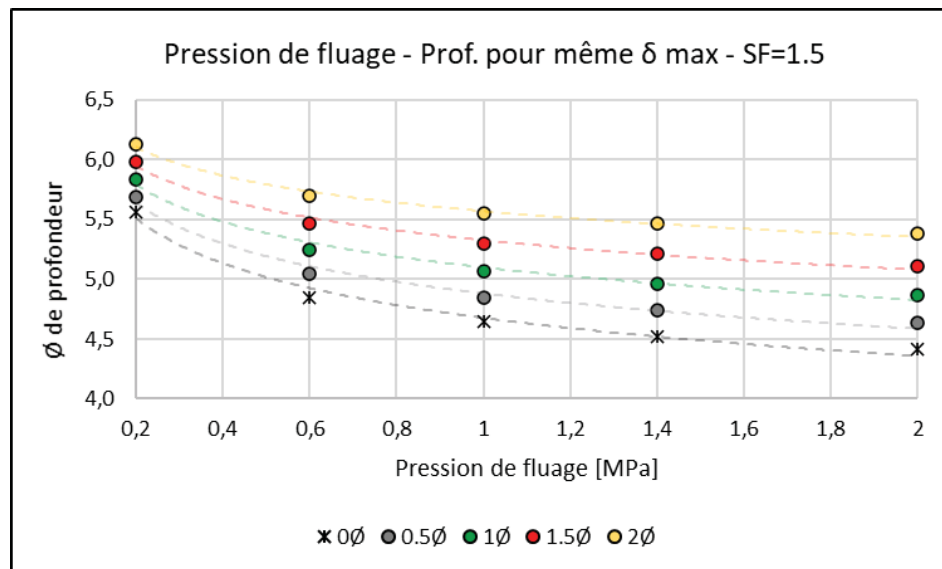
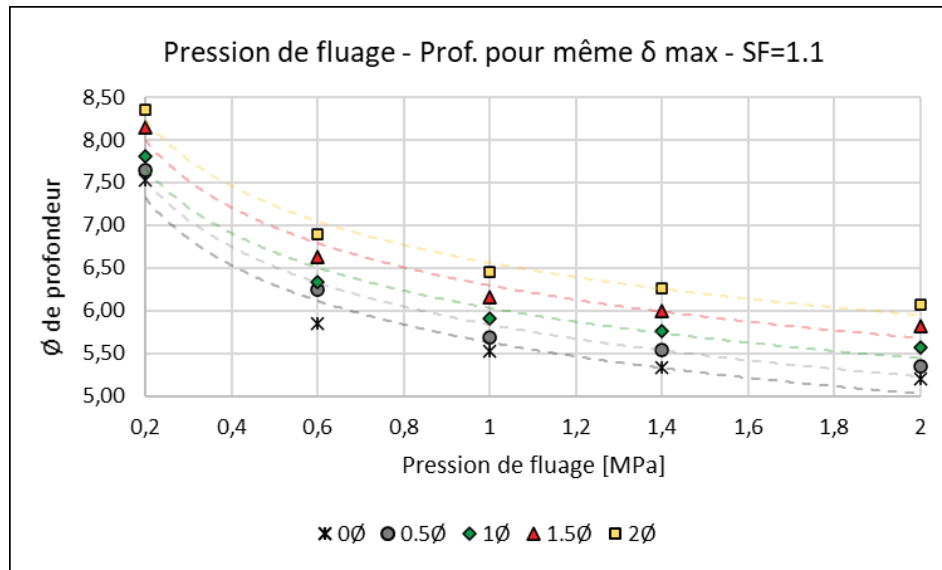
## Influencia de la duración de la carga y tipo de suelo sobre la prof para momento max



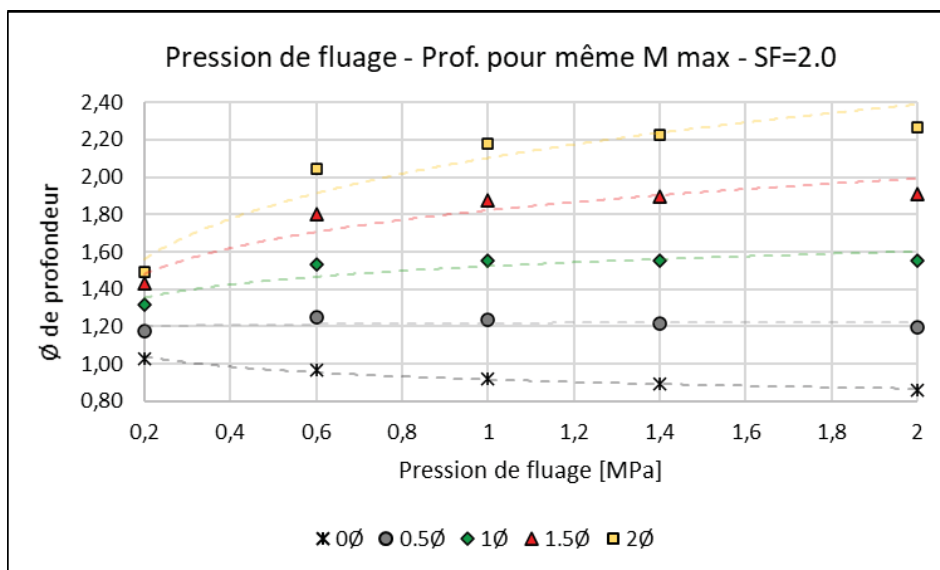
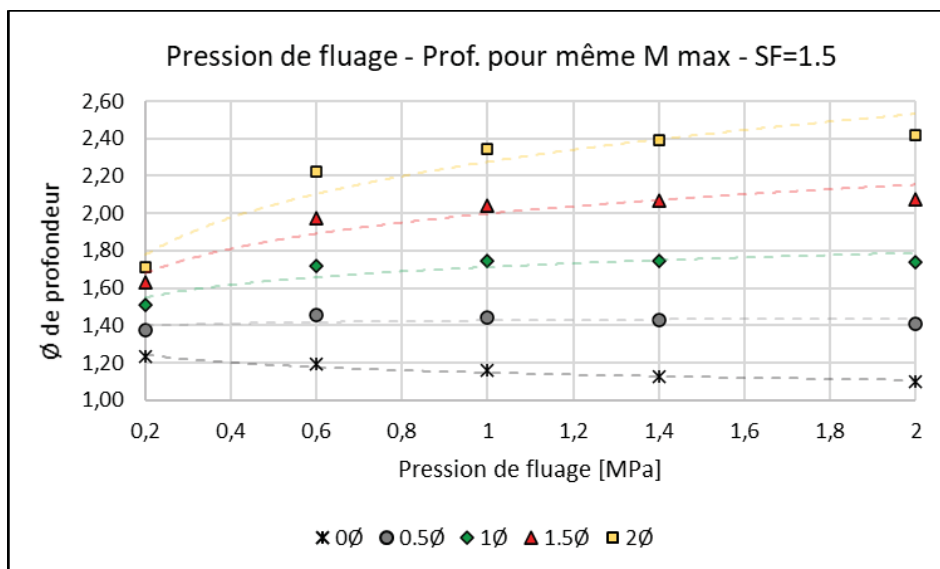
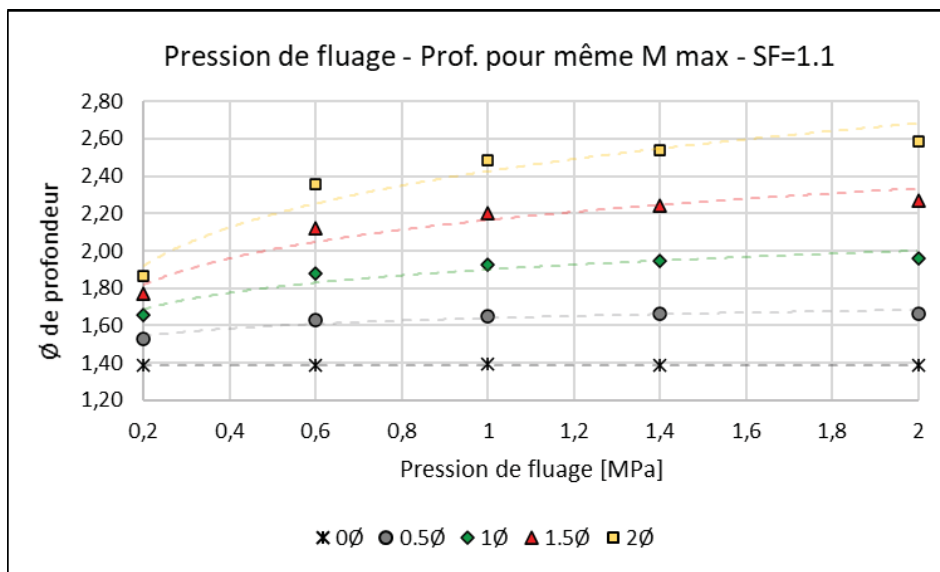
## Influencia de una capa de limo sobre la profundidad de empotramiento



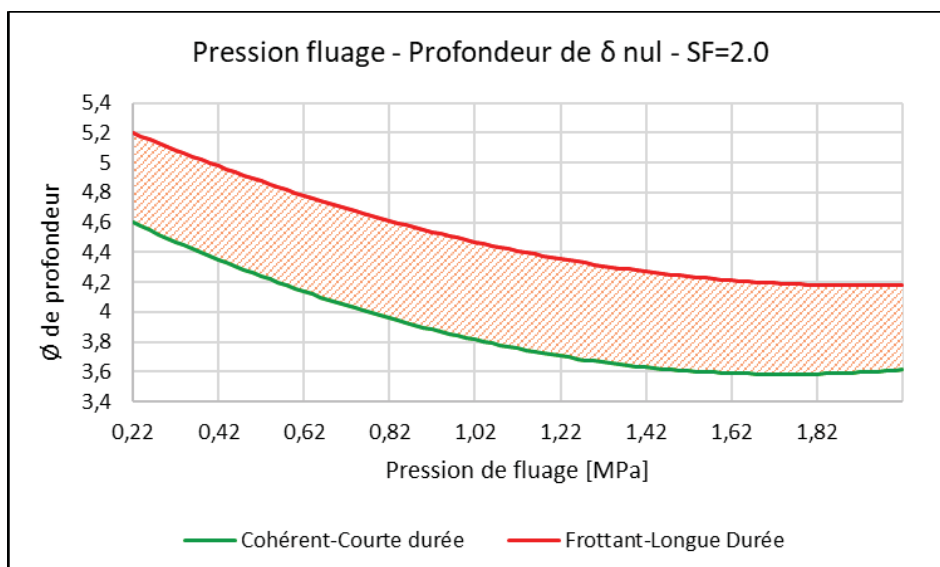
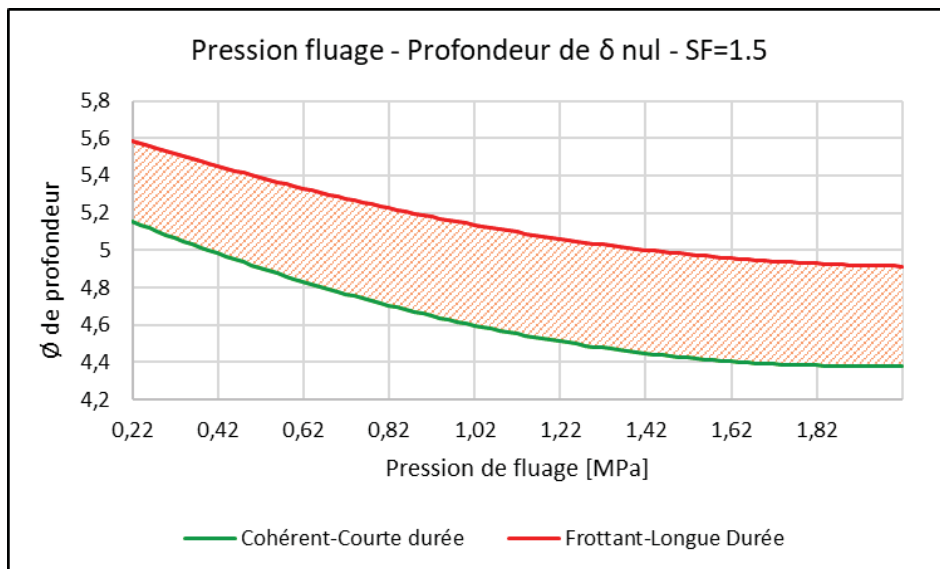
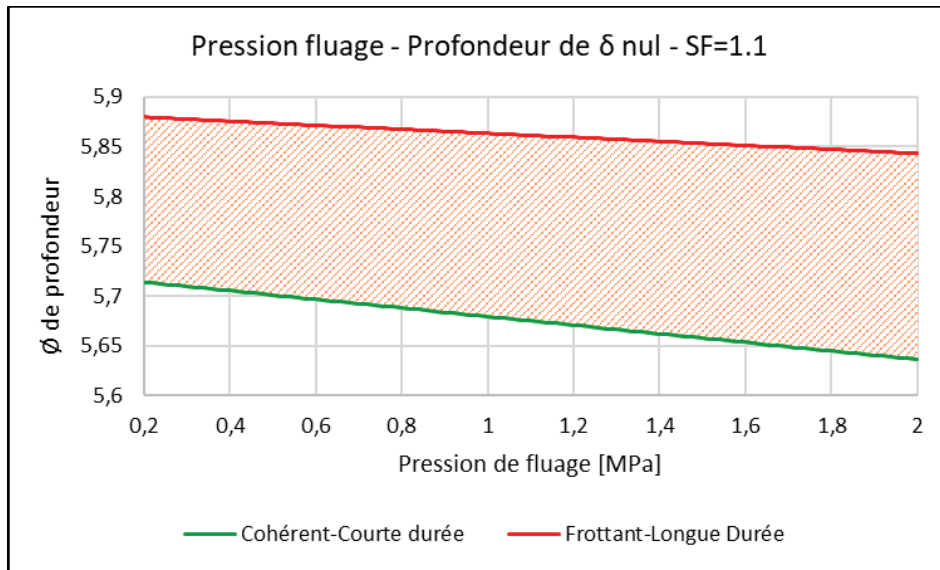
## Influencia de una capa de limo sobre la profundidad para desplazamiento máximo



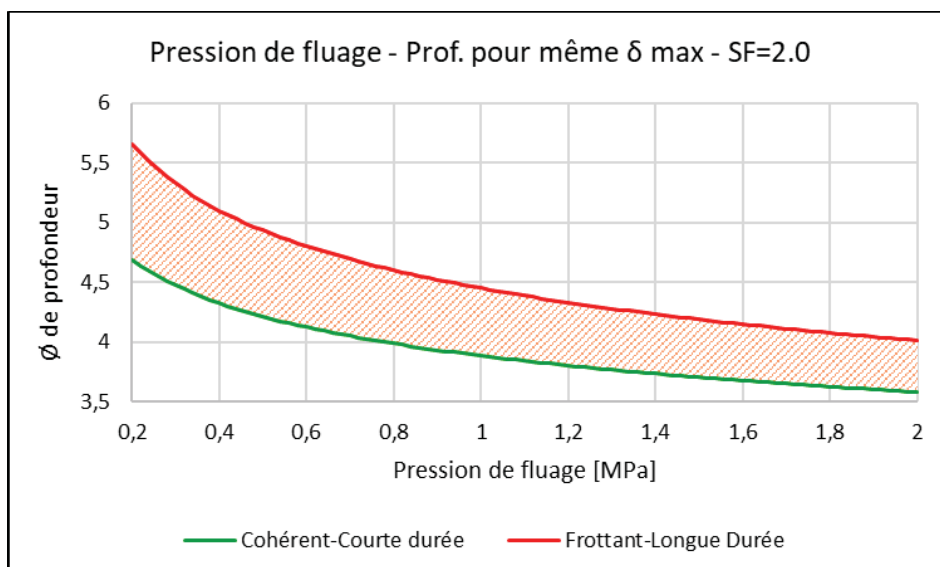
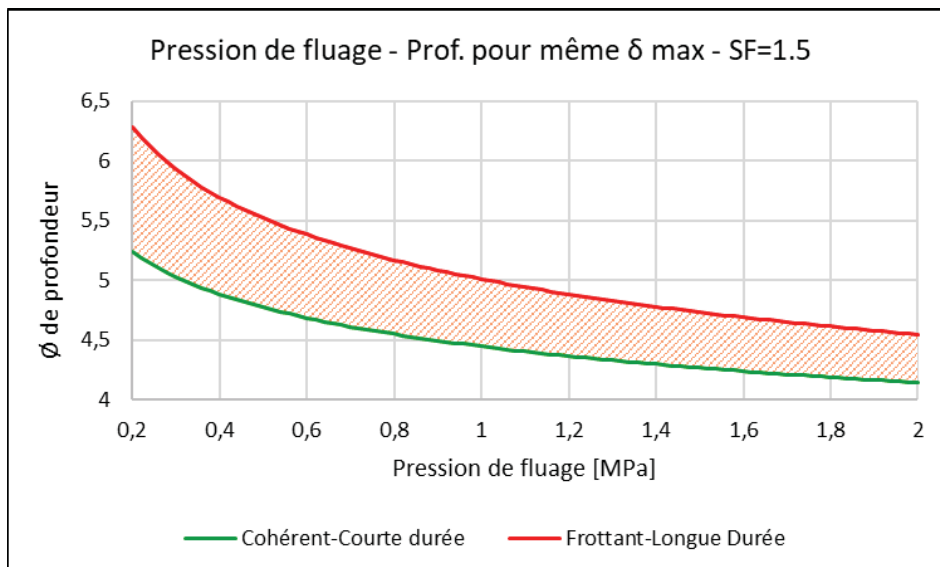
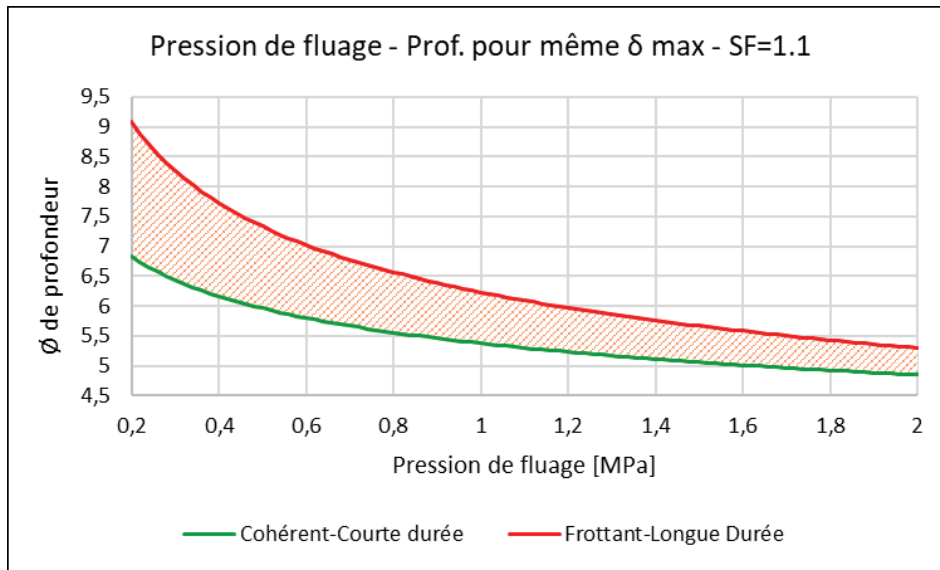
## Influencia de una capa de limo sobre la profundidad para momento máximo



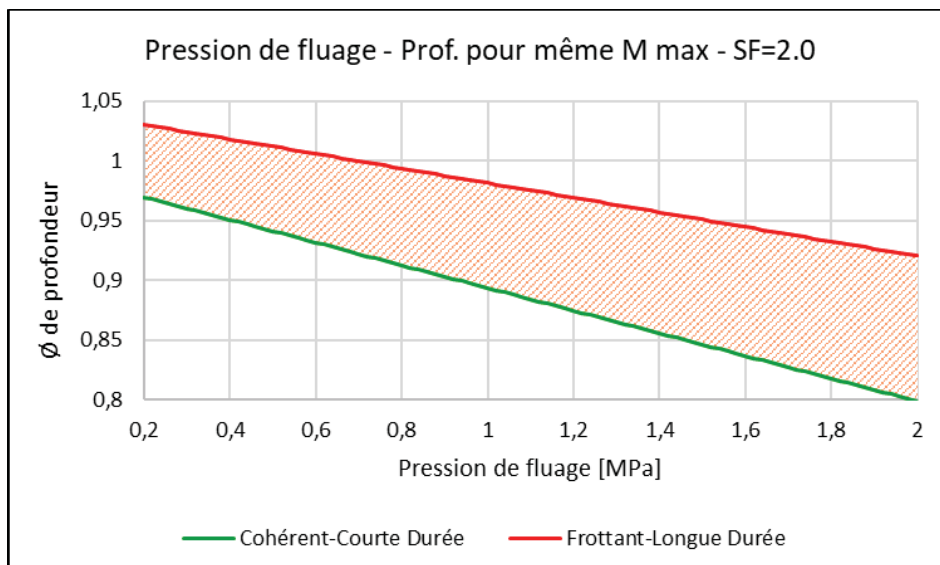
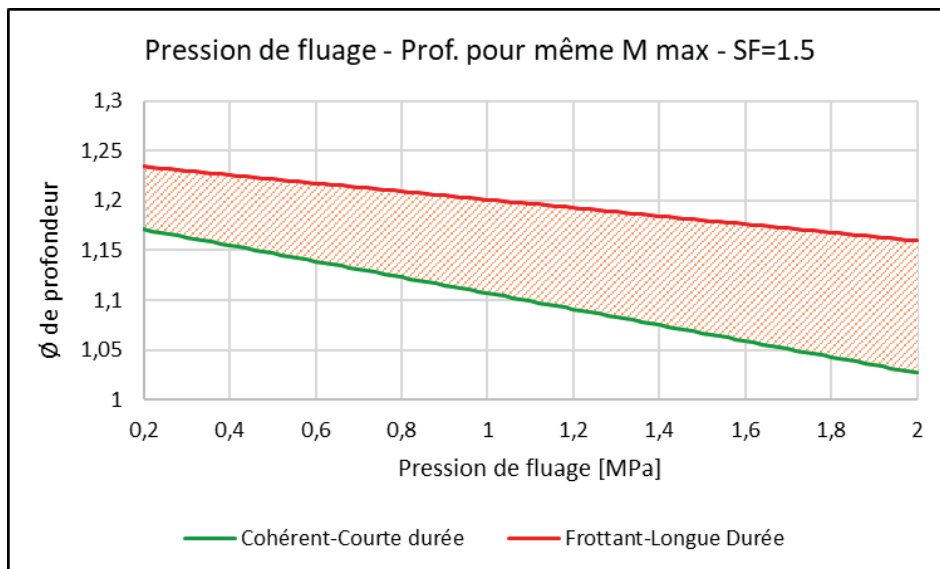
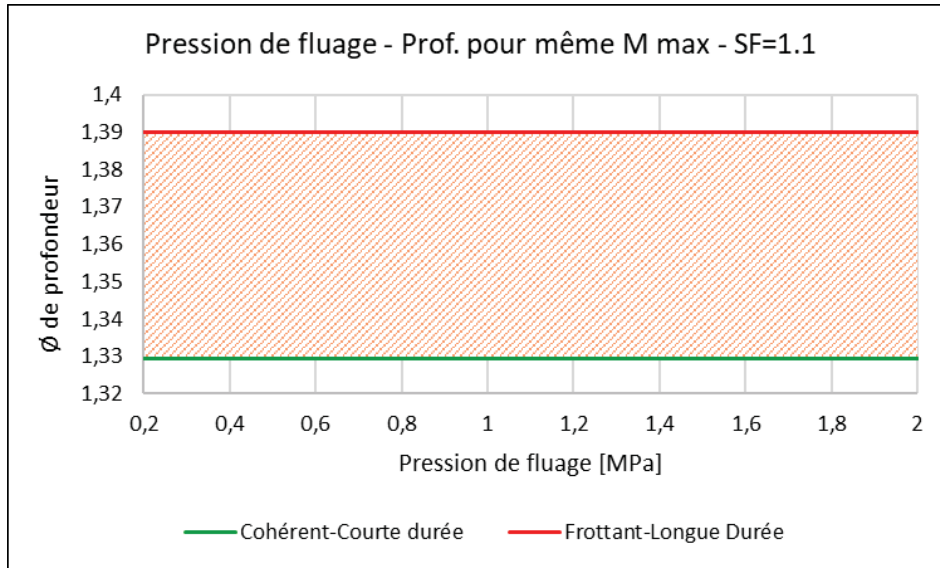
## Límites de la influencia de la duración de la carga y el tipo de suelo sobre la profundidad de empotramiento



## Límites de la influencia de la duración de la carga y el tipo de suelo sobre la profundidad para desplazamiento máximo



## Límites de la influencia de la duración de la carga y el tipo de suelo sobre la profundidad para momento máximo



## Anexo 4: Comparación de los errores de MISS QSP

| Comparaison Modèles en Sable $P=0.2$ MPa; $E_m=4$ MPa |                    |                    |                    |                     |                         |                         |
|-------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| Cas charge                                            | Accost sym 1000 kN | Accost sym 4000 kN | Accost sym 5500 kN | Accost Asym 5500 kN | Accost+Mom Asym 5500 kN | Amar Sym InclIn 5000 kN |
| Pieu critique                                         | B2                 | B2                 | B2                 | A2                  | A2                      | A1                      |
| Pied pieu                                             | $\phi=1,2m$        | $\phi=1,2m$        | $\phi=1,2m$        | $\phi=1,2m$         | $\phi=1,2m$             | $\phi=1,2m$             |
| SF butée pieu critique                                | 9,5                | 2,3                | 1,73               | 1,68                | 1,67                    | 1,89                    |
| Modèle EP complet                                     | -991               | -4224              | -5892              | -6076               | -6102                   | 5171                    |
| Modèle encasté                                        | -1355              | -5421              | -7453              | -8718               | -8827                   | 7177                    |
| % erreur                                              | <b>36,7%</b>       | <b>28,3%</b>       | <b>26,5%</b>       | <b>43,5%</b>        | <b>44,7%</b>            | <b>38,8%</b>            |
| Modèle matrice de raideur                             | -1051              | -4203              | -5779              | -6793               | -6843                   | 5189                    |
| % erreur                                              | <b>6,1%</b>        | <b>0,5%</b>        | <b>1,9%</b>        | <b>11,8%</b>        | <b>12,2%</b>            | <b>0,3%</b>             |
| Modèle EP complet                                     | 1991               | 8852               | 12768              | 13247               | 13357                   | 11962                   |
| Modèle encasté                                        | 2051               | 8206               | 11283              | 13030               | 13238                   | 12007                   |
| % erreur                                              | <b>3,0%</b>        | <b>7,3%</b>        | <b>11,6%</b>       | <b>1,6%</b>         | <b>0,9%</b>             | <b>0,4%</b>             |
| Modèle matrice de raideur                             | 2054               | 8215               | 11295              | 13044               | 13190                   | 10984                   |
| % erreur                                              | <b>3,1%</b>        | <b>7,2%</b>        | <b>11,5%</b>       | <b>1,5%</b>         | <b>1,3%</b>             | <b>8,2%</b>             |
| Modèle EP complet                                     | 0,0329             | 0,1829             | 0,3014             | 0,3159              | 0,3179                  | -0,2451                 |
| Modèle encasté                                        | 0,0148             | 0,0593             | 0,0815             | 0,0964              | 0,0973                  | -0,0708                 |
| % erreur                                              | <b>55,0%</b>       | <b>67,6%</b>       | <b>73,0%</b>       | <b>69,5%</b>        | <b>69,4%</b>            | <b>71,1%</b>            |
| Modèle matrice de raideur                             | 0,0328             | 0,1310             | 0,1802             | 0,2128              | 0,2141                  | -0,1584                 |
| % erreur                                              | <b>0,5%</b>        | <b>28,3%</b>       | <b>40,2%</b>       | <b>32,7%</b>        | <b>32,6%</b>            | <b>35,4%</b>            |

| Comparaison Modèles en Sable $P=0,2$ MPa; $E_m=4$ MPa et Vase $Pf=0,1$ MPa; $E_m=2$ MPa d'épaisseur 1 $\phi$ |                     |                     |                     |                     |                         |                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| Cas charge                                                                                                   | Accost sym 1000 kN  | Accost sym 4000 kN  | Accost sym 5500 kN  | Accost Asym 5500 kN | Accost+M/m Asym 5500 kN | Amarr Sym Inclm 5000 kN |
| Pieu critique                                                                                                | B2                  | B2                  | B2                  | A2                  | A2                      | A1                      |
| Pied pieu                                                                                                    | $\phi+0,5\phi=1,8m$ | $\phi+0,5\phi=1,8m$ | $\phi+0,5\phi=1,8m$ | $\phi+0,5\phi=1,8m$ | $\phi+0,5\phi=1,8m$     | $\phi+0,5\phi=1,8m$     |
| Sf butée pieu critique                                                                                       | 9,1                 | 2,26                | 1,66                | 1,61                | 1,61                    | 1,83                    |
| Modèle EP complet                                                                                            | -1030               | -4386               | -6097               | -6292               | -6313                   | 5379                    |
| Modèle encastré                                                                                              | -1418               | -5670               | -7796               | -9112               | -9220                   | 7453                    |
| % erreur                                                                                                     | 37,6%               | 29,3%               | 27,9%               | 44,8%               | 46,0%                   | 38,6%                   |
| Modèle matrice de raideur                                                                                    | -1121               | -4482               | -6163               | -7237               | -7289                   | 5546                    |
| % erreur                                                                                                     | 8,8%                | 2,2%                | 1,1%                | 15,0%               | 15,5%                   | 3,1%                    |
| Modèle EP complet                                                                                            | 2065                | 9166                | 13188               | 13706               | 13810                   | 12310                   |
| Modèle encastré                                                                                              | 2164                | 8656                | 11903               | 13739               | 13946                   | 12452                   |
| % erreur                                                                                                     | 4,8%                | 5,6%                | 9,7%                | 0,2%                | 1,0%                    | 1,2%                    |
| Modèle matrice de raideur                                                                                    | 2166                | 8663                | 11906               | 13751               | 13900                   | 11502                   |
| % erreur                                                                                                     | 4,9%                | 5,5%                | 9,7%                | 0,3%                | 0,7%                    | 6,6%                    |
| Modèle EP complet                                                                                            | 0,0353              | 0,1954              | 0,3209              | 0,3371              | 0,3392                  | -0,2616                 |
| Modèle encastré                                                                                              | 0,0170              | 0,0680              | 0,0935              | 0,1105              | 0,1115                  | -0,0813                 |
| % erreur                                                                                                     | 51,9%               | 65,2%               | 70,9%               | 67,2%               | 67,1%                   | 68,9%                   |
| Modèle matrice de raideur                                                                                    | 0,0354              | 0,1415              | 0,1945              | 0,2296              | 0,2310                  | -0,1711                 |
| % erreur                                                                                                     | 0,1%                | 27,6%               | 39,4%               | 31,9%               | 31,9%                   | 34,6%                   |

| Comparaison Modèles en Sable $P_f=0,2$ MPa; $E_m=4$ MPa et Vase $P_f=0,1$ MPa; $E_m=2$ MPa d'épaisseur $2\phi$ |                    |                    |                    |                     |                         |                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|
| Cas charge                                                                                                     | Accost sym 1000 kN | Accost sym 4000 kN | Accost sym 5500 kN | Accost Asym 5500 kN | Accost+Mom Asym 5500 kN | Amar Sym Incln 5000 kN |
| Pieu critique                                                                                                  | B2                 | B2                 | B2                 | A2                  | A2                      | A1                     |
| Pied pieu                                                                                                      | $\phi+\phi=2,4m$   | $\phi+\phi=2,4m$   | $\phi+\phi=2,4m$   | $\phi+\phi=2,4m$    | $\phi+\phi=2,4m$        | $\phi+\phi=2,4m$       |
| SF butée pieu critique                                                                                         | 8,88               | 2,16               | 1,6                | 1,55                | 1,54                    | 1,75                   |
| Modèle EP complet                                                                                              | -1026              | -4510              | -6251              | -6464               | -6471                   | 5530                   |
| Modèle encastré                                                                                                | -1479              | -5918              | -8137              | -9504               | -9611                   | 7726                   |
| % erreur                                                                                                       | 44,2%              | 31,2%              | 30,2%              | 47,0%               | 48,5%                   | 39,7%                  |
| Modèle matrice de raideur                                                                                      | -1197              | -4787              | -6582              | -7721               | -7777                   | 5935                   |
| % erreur                                                                                                       | 16,6%              | 6,1%               | 5,3%               | 19,4%               | 20,2%                   | 7,3%                   |
| Modèle EP complet                                                                                              | 2085               | 9445               | 13557              | 14109               | 14200                   | 12597                  |
| Modèle encastré                                                                                                | 2277               | 9106               | 12521              | 14448               | 14653                   | 12897                  |
| % erreur                                                                                                       | 9,2%               | 3,6%               | 7,6%               | 2,4%                | 3,2%                    | 2,4%                   |
| Modèle matrice de raideur                                                                                      | 2277               | 9108               | 12523              | 14455               | 14607                   | 12026                  |
| % erreur                                                                                                       | 9,2%               | 3,6%               | 7,6%               | 2,4%                | 2,9%                    | 4,5%                   |
| Modèle EP complet                                                                                              | 0,0372             | 0,2089             | 0,3424             | 0,3602              | 0,3623                  | -0,2798                |
| Modèle encastré                                                                                                | 0,0194             | 0,0775             | 0,1065             | 0,1259              | 0,1269                  | -0,0927                |
| % erreur                                                                                                       | 47,9%              | 62,9%              | 68,9%              | 65,1%               | 65,0%                   | 66,9%                  |
| Modèle matrice de raideur                                                                                      | 0,0377             | 0,1508             | 0,2073             | 0,2446              | 0,2461                  | -0,1824                |
| % erreur                                                                                                       | 1,4%               | 27,8%              | 39,4%              | 32,1%               | 32,1%                   | 34,8%                  |

| Comparaison Modèles en Sable P=0.7 MPa; E <sub>m</sub> =13 MPa |                    |                    |                    |                     |                         |                        |
|----------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|
| Cas charge                                                     | Accost sym 1000 kN | Accost sym 4000 kN | Accost sym 5500 kN | Accost Asym 5500 kN | Accost+Mom Asym 5500 kN | Amar Sym Incln 5000 kN |
| Pieu critique                                                  | B2                 | B2                 | B2                 | A2                  | A2                      | A1                     |
| Pied pieu                                                      | 0,5φ=0,6m          | 0,5φ=0,6m          | 0,5φ=0,6m          | 0,5φ=0,6m           | 0,5φ=0,6m               | 0,5φ=0,6m              |
| SF butée pieu critique                                         | 27,3               | 6,8                | 5,1                | 4,4                 | 4,4                     | 5,7                    |
| Modèle EP complet                                              | -1026              | -4198              | -5734              | -6377               | -6423                   | 5124                   |
| Modèle encastré                                                | -1292              | -5168              | -7107              | -8319               | -8430                   | 6899                   |
| % erreur                                                       | 25,9%              | 23,1%              | 23,9%              | 30,5%               | 31,3%                   | 34,6%                  |
| Modèle matrice de raideur                                      | -1042              | -4168              | -5732              | -6734               | -6791                   | 5189                   |
| % erreur                                                       | 1,5%               | 0,7%               | 0,0%               | 5,6%                | 5,7%                    | 1,3%                   |
| Modèle EP complet                                              | 1926               | 7878               | 10977              | 12283               | 12420                   | -11030                 |
| Modèle encastré                                                | 1938               | 7753               | 10660              | 12320               | 12530                   | -11563                 |
| % erreur                                                       | 0,6%               | 1,6%               | 2,9%               | 0,3%                | 0,9%                    | 4,8%                   |
| Modèle matrice de raideur                                      | 1945               | 7781               | 10702              | 12353               | 12508                   | -10653                 |
| % erreur                                                       | 1,0%               | 1,2%               | 2,5%               | 0,6%                | 0,7%                    | 3,4%                   |
| Modèle EP complet                                              | 0,0261             | 0,1100             | 0,1634             | 0,1870              | 0,1884                  | -0,1368                |
| Modèle encastré                                                | 0,0128             | 0,0513             | 0,0705             | 0,0835              | 0,0843                  | -0,0611                |
| % erreur                                                       | 50,8%              | 53,4%              | 56,8%              | 55,3%               | 55,2%                   | 55,3%                  |
| Modèle matrice de raideur                                      | 0,0257             | 0,1028             | 0,1414             | 0,1670              | 0,1682                  | -0,1238                |
| % erreur                                                       | 1,5%               | 6,5%               | 13,5%              | 10,7%               | 10,7%                   | 9,5%                   |

| Comparaison Modèles en Sable $P_i=0.7$ MPa; $E_m=14$ MPa et Vase $P_i=0.1$ MPa; $E_m=2$ MPa d'épaisseur 10 |                              |                              |                              |                              |                              |                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Cas charge                                                                                                 | Accost sym 1000 kN           | Accost sym 4000 kN           | Accost sym 5500 kN           | Accost Asym 5500 kN          | Accost+Mlom Asym 5500 kN     | Amar Sym Inclm 5000 kN       |
| Pieu critique                                                                                              | B2                           | B2                           | B2                           | A2                           | A2                           | A1                           |
| Pied pieu                                                                                                  | 0,5 $\phi$ +0,5 $\phi$ =1,2m | 0,5 $\phi$ +0,5 $\phi$ =1,2m | 0,5 $\phi$ +0,5 $\phi$ =1,2m | 0,5 $\phi$ +0,5 $\phi$ =1,2m | 0,5 $\phi$ +0,5 $\phi$ =1,2m | 0,5 $\phi$ +0,5 $\phi$ =1,2m |
| Sf butée pieu critique                                                                                     | 24,69                        | 6                            | 4,39                         | 3,95                         | 3,92                         | 4,76                         |
| Modèle EP complet                                                                                          | -1110                        | -4575                        | -6296                        | -6914                        | -6952                        | 5617                         |
| Modèle encastré                                                                                            | -1355                        | -5421                        | -7453                        | -8718                        | -8827                        | 7177                         |
| % erreur                                                                                                   | <b>22,1%</b>                 | <b>18,5%</b>                 | <b>18,4%</b>                 | <b>26,1%</b>                 | <b>27,0%</b>                 | <b>27,8%</b>                 |
| Modèle matrice de raideur                                                                                  | -1176                        | -4705                        | -6470                        | -7583                        | -7655                        | 5948                         |
| % erreur                                                                                                   | <b>6,0%</b>                  | <b>2,9%</b>                  | <b>2,8%</b>                  | <b>9,7%</b>                  | <b>10,1%</b>                 | <b>5,9%</b>                  |
| Modèle EP complet                                                                                          | 2074                         | 8535                         | 11924                        | 13251                        | 13379                        | 11751                        |
| Modèle encastré                                                                                            | 2051                         | 8206                         | 11283                        | 13030                        | 13238                        | 12007                        |
| % erreur                                                                                                   | <b>1,1%</b>                  | <b>3,9%</b>                  | <b>5,4%</b>                  | <b>1,7%</b>                  | <b>1,1%</b>                  | <b>2,2%</b>                  |
| Modèle matrice de raideur                                                                                  | 2060                         | 8241                         | 11331                        | 13072                        | 13243                        | 11381                        |
| % erreur                                                                                                   | <b>0,6%</b>                  | <b>3,4%</b>                  | <b>5,0%</b>                  | <b>1,4%</b>                  | <b>1,0%</b>                  | <b>3,1%</b>                  |
| Modèle EP complet                                                                                          | 0,0299                       | 0,1270                       | 0,1877                       | 0,2146                       | 0,2161                       | -0,1580                      |
| Modèle encastré                                                                                            | 0,0148                       | 0,0593                       | 0,0815                       | 0,0964                       | 0,0973                       | -0,0708                      |
| % erreur                                                                                                   | <b>50,5%</b>                 | <b>53,3%</b>                 | <b>56,6%</b>                 | <b>55,1%</b>                 | <b>55,0%</b>                 | <b>55,2%</b>                 |
| Modèle matrice de raideur                                                                                  | 0,0237                       | 0,0948                       | 0,1304                       | 0,1541                       | 0,1553                       | -0,1140                      |
| % erreur                                                                                                   | <b>20,7%</b>                 | <b>25,3%</b>                 | <b>30,5%</b>                 | <b>28,2%</b>                 | <b>28,2%</b>                 | <b>27,9%</b>                 |

| Comparaison Modèles en Sable P=0,7 MPa; E <sub>m</sub> =14 MPa et Vase P <sub>f</sub> =0,1 MPa; E <sub>m</sub> =2 MPa d'épaisseur 2Ø |                    |                    |                    |                     |                         |              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|--------------|
| Cas charge                                                                                                                           | Accost sym 1000 kN | Accost sym 4000 kN | Accost sym 5500 kN | Accost Asym 5500 kN | Accost+Mom Asym 5500 kN | A1           |
| Pieu critique                                                                                                                        | B2                 | B2                 | B2                 | A2                  | A2                      | A1           |
| Pied pieu                                                                                                                            | 0,5Ø+1Ø=1,8m       | 0,5Ø+1Ø=1,8m       | 0,5Ø+1Ø=1,8m       | 0,5Ø+1Ø=1,8m        | 0,5Ø+1Ø=1,8m            | 0,5Ø+1Ø=1,8m |
| SF butée pieu critique                                                                                                               | 23,26              | 5,46               | 3,96               | 3,95                | 3,6                     | 4,32         |
| Modèle EP complet                                                                                                                    | -1128              | -4867              | -6739              | -7443               | -7484                   | 6011         |
| Modèle encastré                                                                                                                      | -1418              | -5670              | -7796              | -9112               | -9220                   | 7453         |
| % erreur                                                                                                                             | 25,7%              | 16,5%              | 15,7%              | 22,4%               | 23,2%                   | 24,0%        |
| Modèle matrice de raideur                                                                                                            | -1143              | -4573              | -6288              | -7379               | -7436                   | 5678         |
| % erreur                                                                                                                             | 1,4%               | 6,0%               | 6,7%               | 0,9%                | 0,6%                    | 5,5%         |
| Modèle EP complet                                                                                                                    | 2145               | 9117               | 12764              | 14222               | 14354                   | 12384        |
| Modèle encastré                                                                                                                      | 2164               | 8656               | 11903              | 13739               | 13946                   | 12452        |
| % erreur                                                                                                                             | 0,9%               | 5,1%               | 6,8%               | 3,4%                | 2,8%                    | 0,5%         |
| Modèle matrice de raideur                                                                                                            | 2168               | 8673               | 11925              | 13762               | 13916                   | 11572        |
| % erreur                                                                                                                             | 1,1%               | 4,9%               | 6,6%               | 3,2%                | 3,1%                    | 6,6%         |
| Modèle EP complet                                                                                                                    | 0,0336             | 0,1469             | 0,2162             | 0,2463              | 0,2480                  | -0,1826      |
| Modèle encastré                                                                                                                      | 0,0170             | 0,0680             | 0,0935             | 0,1105              | 0,1115                  | -0,0813      |
| % erreur                                                                                                                             | 49,4%              | 53,7%              | 56,8%              | 55,1%               | 55,0%                   | 55,5%        |
| Modèle matrice de raideur                                                                                                            | 0,0335             | 0,1334             | 0,1834             | 0,2166              | 0,2179                  | -0,1611      |
| % erreur                                                                                                                             | 0,2%               | 9,2%               | 15,2%              | 12,1%               | 12,1%                   | 11,7%        |

| Comparaison Modèles en Sable P=1,0 MPa; E <sub>m</sub> =20 MPa |                    |                    |                    |                     |                         |           |
|----------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|-----------|
| Cas charge                                                     | Accost sym 1000 kN | Accost sym 4000 kN | Accost sym 5500 kN | Accost Asym 5500 kN | Accost+Mom Asym 5500 kN | A1        |
| Pieu critique                                                  | B2                 | B2                 | B2                 | A2                  | A2                      | A1        |
| Pied pieu                                                      | 0,5φ=0,6m          | 0,5φ=0,6m          | 0,5φ=0,6m          | 0,5φ=0,6m           | 0,5φ=0,6m               | 0,5φ=0,6m |
| SF butée pieu critique                                         | 36,8               | 9,09               | 6,53               | 5,8                 | 5,75                    | 7         |
| Modèle EP complet                                              | -1048              | -4174              | -5824              | -6566               | -6614                   | 5236      |
| Modèle encastré                                                | -1292              | -5168              | -7106              | -7979               | -8085                   | 6985      |
| % erreur                                                       | 23,3%              | 23,8%              | 22,0%              | 21,5%               | 22,3%                   | 33,4%     |
| Modèle matrice de raideur                                      | -1070              | -4281              | -5887              | -7046               | -7109                   | 5359      |
| % erreur                                                       | 2,2%               | 2,6%               | 1,1%               | 7,3%                | 7,5%                    | 2,4%      |
| Modèle EP complet                                              | 1917               | 7694               | 10785              | 12239               | 12379                   | 10983     |
| Modèle encastré                                                | 1938               | 7753               | 10660              | 11816               | 12019                   | 11557     |
| % erreur                                                       | 1,1%               | 0,8%               | 1,2%               | 3,5%                | 2,9%                    | 5,2%      |
| Modèle matrice de raideur                                      | 1946               | 7786               | 10705              | 12590               | 12752                   | 10740     |
| % erreur                                                       | 1,5%               | 1,2%               | 0,7%               | 2,9%                | 3,0%                    | 2,2%      |
| Modèle EP complet                                              | 0,0243             | 0,0999             | 0,1451             | 0,1682              | 0,1694                  | -0,1214   |
| Modèle encastré                                                | 0,0128             | 0,0513             | 0,0705             | 0,0801              | 0,0809                  | -0,0611   |
| % erreur                                                       | 47,2%              | 48,7%              | 51,4%              | 52,4%               | 52,3%                   | 49,7%     |
| Modèle matrice de raideur                                      | 0,0239             | 0,0955             | 0,1313             | 0,1582              | 0,1594                  | -0,1148   |
| % erreur                                                       | 1,6%               | 4,4%               | 9,5%               | 5,9%                | 5,9%                    | 5,4%      |

| Comparaison Modèles en Sable $P_f=1$ MPa; $E_m=20$ MPa et Vase $P_f=0,1$ MPa; $E_m=1$ MPa d'épaisseur 10 |                    |                    |                    |                     |                         |                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|
| Cas charge                                                                                               | Accost sym 1000 kN | Accost sym 4000 kN | Accost sym 5500 kN | Accost Asym 5500 kN | Accost+Mom Asym 5500 kN | Amar Sym Incln 5000 kN |
| Pieu critique                                                                                            | B2                 | B2                 | B2                 | A2                  | A2                      | A1                     |
| Pied pieu                                                                                                | 0,50+0,50=1,2m     | 0,50+0,50=1,2m     | 0,50+0,50=1,2m     | 0,50+0,50=1,2m      | 0,50+0,50=1,2m          | 0,50+0,50=1,2m         |
| SF butée pieu critique                                                                                   | 32,87              | 8,22               | 5,88               | 5,17                | 5,13                    | 6,3                    |
| Modèle EP complet                                                                                        | -1135              | -4534              | -6350              | -7183               | -7234                   | 5746                   |
| Modèle encastré                                                                                          | -1355              | -5421              | -7453              | -8718               | -8827                   | 7177                   |
| % erreur                                                                                                 | <b>19,4%</b>       | <b>19,6%</b>       | <b>17,4%</b>       | <b>21,4%</b>        | <b>22,0%</b>            | <b>24,9%</b>           |
| Modèle matrice de raideur                                                                                | -1184              | -4735              | -6510              | -7629               | -7702                   | 5993                   |
| % erreur                                                                                                 | <b>4,3%</b>        | <b>4,4%</b>        | <b>2,5%</b>        | <b>6,2%</b>         | <b>6,5%</b>             | <b>4,3%</b>            |
| Modèle EP complet                                                                                        | 2080               | 8365               | 11726              | 13348               | 13491                   | 11754                  |
| Modèle encastré                                                                                          | 2051               | 8206               | 11283              | 13030               | 13238                   | 12007                  |
| % erreur                                                                                                 | <b>1,4%</b>        | <b>1,9%</b>        | <b>3,8%</b>        | <b>2,4%</b>         | <b>1,9%</b>             | <b>2,2%</b>            |
| Modèle matrice de raideur                                                                                | 2060               | 8240               | 11330              | 13070               | 13242                   | 11403                  |
| % erreur                                                                                                 | <b>0,9%</b>        | <b>1,5%</b>        | <b>3,4%</b>        | <b>2,1%</b>         | <b>1,8%</b>             | <b>3,0%</b>            |
| Modèle EP complet                                                                                        | 0,0286             | 0,1183             | 0,1704             | 0,1979              | 0,1993                  | -0,1439                |
| Modèle encastré                                                                                          | 0,0148             | 0,0593             | 0,0815             | 0,0964              | 0,0973                  | -0,0708                |
| % erreur                                                                                                 | <b>48,3%</b>       | <b>49,9%</b>       | <b>52,2%</b>       | <b>51,3%</b>        | <b>51,2%</b>            | <b>50,8%</b>           |
| Modèle matrice de raideur                                                                                | 0,0233             | 0,0932             | 0,1282             | 0,1515              | 0,1526                  | -0,1120                |
| % erreur                                                                                                 | <b>18,6%</b>       | <b>21,2%</b>       | <b>24,8%</b>       | <b>23,5%</b>        | <b>23,4%</b>            | <b>22,2%</b>           |