

Projet Étudiant d'Entreprise n°13 :
Étude du dimensionnement d'un trépan

Rapport d'étude
2023-2024

Groupe P2E

GAZZOLA Matteo
JOLY Morgane
MERHEB Sophie
PROUTIER Charline
GAGNIERE Pierre-Jules
BOUNOUA Ilyas

Tuteur enseignant

LE VERN Mickaël

Correspondant entreprise

DU MORTIER Alexandre

Sommaire

I- Présentation

- 1) Présentation de l'entreprise p. 3
- 2) Présentation du Projet p. 3
- 3) Les livrables p. 4

II- Démarche

- 1) Etapes du projet p. 5
- 2) Difficultés rencontrées et solutions trouvées pour les surmonter p. 6

III- Hypothèses retenues et équations

- 1) Hypothèses retenues p. 7
- 2) Explications et calculs (d'après groupe P2E 2022) p. 8

IV- Résultats

- 1) Calculs p. 14
- 2) Historique des modifications faites sur le tableur par rapport au P2E 2022 p. 16

Conclusion p. 17

Remerciements p. 17

Bibliographie p. 18

I-Présentation

1) Présentation de l'entreprise :

Le sujet de notre P2E nous a été adressé par le Groupe ETPO. Il s'agit d'une entreprise spécialisée dans le domaine du Génie Civil et particulièrement dans les travaux maritimes et industriels. Elle compte à ce jour 650 collaborateurs et est implantée en métropole, dans les Outre-mer et également à l'international (Canada, Maroc,...). Elle réalise de nombreux projets d'envergure, par exemple le Quai 12 en Guadeloupe.



Figure 1 : Extension du Quai 12 - Jarry, Source Guadeloupe Port Caraïbes

Ce type de grand aménagement portuaire implique la mise en place de pieux afin de soutenir le quai. Ces pieux sont mis en place dans un premier temps par une opération de battage qui consiste à enfoncer le pieux dans le sol à l'aide d'un grand marteau. Puis, si le sol est constitué de roche trop dure, il est nécessaire de mettre en place une opération dite de trépanage. D'après l'entreprise on peut considérer que lorsque le module du sol dépasse les 50 MPA, le battage devient très compliqué et peut occasionner des dégâts sur le matériel. Le trépan devient alors nécessaire. Il s'agit d'une pièce métallique de grande dimension que l'on fait chuter à l'intérieur du pieux afin qu'elle fracture la roche et qu'elle permette au pieux de s'enfoncer dans le sol. Actuellement, l'ETPO effectue l'opération de trépanage pour installer les pieux de manière empirique. Ils se basent sur les différents chantiers déjà effectués et l'expérience de l'entreprise mais ne possèdent pas de modèle capable de déterminer la durée du trépanage. Pourtant, le trépanage est une opération complexe à mettre en œuvre et très chronophage.

2) Présentation du Projet :

L'objectif du projet est de développer une feuille de calculs pour calculer l'avancement du forage par coup de trépan avec une méthode scientifique en s'appuyant sur le rapport 2022. Cette feuille de calcul devra intégrer différents paramètres variables dont : le type de roche, le diamètre du pieu, le poids du trépan et la hauteur de chute du trépan. Ce projet a déjà été étudié à deux reprises.

Le groupe précédent a réussi à obtenir de bons résultats mais seulement pour un type de roche. Notre objectif est donc d'étendre à tous types de roche et d'amener encore plus de précision dans les calculs. Cela permettra ensuite de mieux anticiper la phase de chantier pour chiffrer avec plus de certitude le coût du projet pour l'entreprise. En effet, ils pourront prévoir le type de trépan à transporter sur le chantier en fonction de la roche et déterminer la main-d'œuvre nécessaire et le temps sur chantier pour réaliser l'opération.

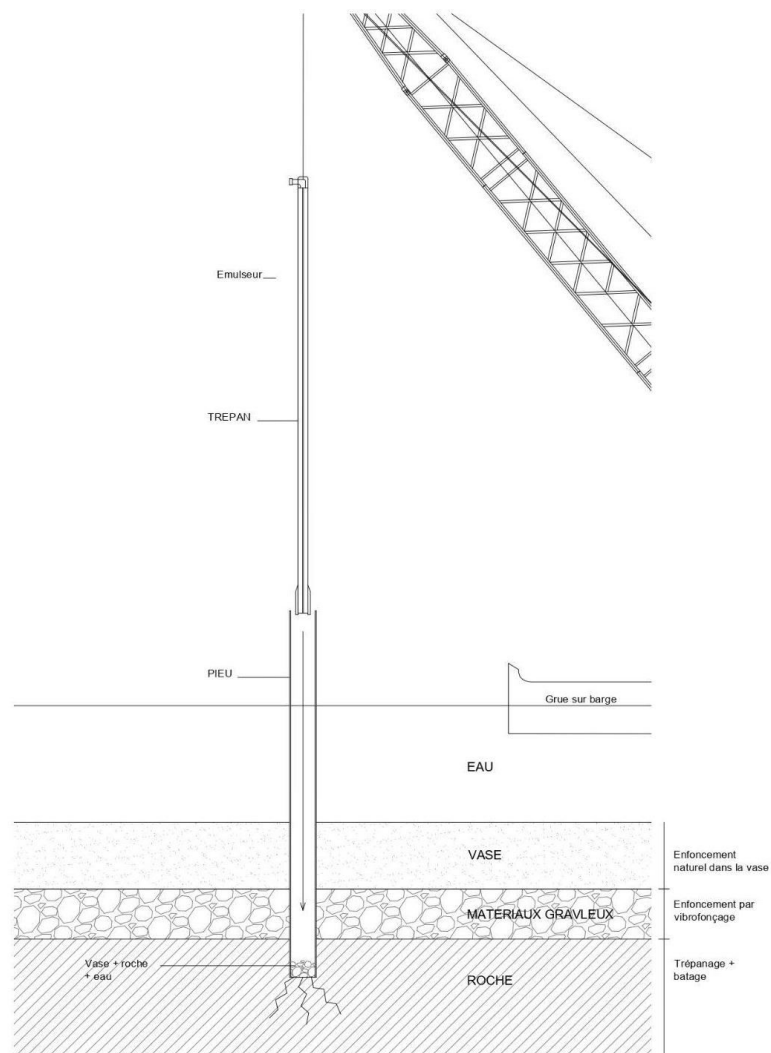


Figure 2 : Schématisation de l'opération de trépanage

3) Les livrables :

Les attendus de l'entreprise vis-à-vis de ce projet sont:

- Reprendre le rapport 2022 et généraliser le modèle de calculs à tous types de roches.

- Étudier la propagation de l'onde dans la roche et déterminer la couche limite à partir de laquelle l'énergie n'est plus suffisante pour briser la roche (profondeur).
- Affiner la précision du modèle, en s'intéressant au critère de Hoek-Brown ou avec une approche énergétique.
- Déterminer le rendement du forage par heure en fonction du poids du trépan, de la hauteur de chute et de la vitesse du treuil de la grue
- Développer et tester la feuille de calcul.
- Réaliser la documentation associée (document de conception et manuel utilisateur).

II- Démarche

1) Etapes du projet

Afin de mener à bien ce projet, nous avons sectionné le travail en plusieurs phases. La première consistait en la compréhension de ce qui avait déjà été fait lors des P2E passés et la délimitation d'un cadre d'étude. Pour cela, nous avons d'abord réalisé une analyse approfondie du sujet ainsi que des travaux effectués par les rapports des années précédentes afin d'identifier les hypothèses du problème et leurs limites. Lors de cette première partie, nous nous sommes également rendus au siège d'ETPO afin de mettre un visage sur notre interlocuteur, Alexandre Du Mortier, et de mieux appréhender les attentes formulées par écrit.

La seconde étape du projet avait pour but d'identifier et regrouper les informations nécessaires à la compréhension du problème : bibliographie, modèles et équations. Nous avons notamment pris le temps de comprendre ce qu'est un critère de rupture de roche.

Ensuite, au mois de février, nous avons tenté de comprendre comment utiliser ces informations dans le projet. Nous nous sommes alors répartis précisément les tâches afin de nous intéresser au critère de Hoek Brown, comprendre l'approche énergétique du problème, dessiner et schématiser les informations recueillies et les étapes d'un battage-trépanage, approfondir ce qu'est un critère de rupture d'une roche et enfin comprendre les efforts appliqués sur les roches et sur le problème en général.

La phase suivante, début mars, a été celle du partage des connaissances acquises au sein du groupe mais aussi avec le tuteur et l'entreprise, et le commencement du projet. Cela nous a permis de préciser les équations utiles, de commencer la rédaction des rapports et d'améliorer la feuille de calcul afin de la généraliser à tous les types de roches.

Enfin, nous avons éprouvé notre feuille de calcul aux données communiquées par l'entreprise et comparé nos résultats à ceux expérimentaux. Nous avons également pu finaliser la rédaction du rapport et celle du manuel utilisateur.

Ces différentes étapes ont été ponctuées par des réunions régulières (toutes les trois semaines) en visioconférence, avec l'entreprise ETPO, qui ont permis d'éclairer nos doutes à mesure de l'avancement du projet. Celle-ci nous a également fourni des documents précieux à la compréhension du problème tels que des études géotechniques, des fiches de présentation du matériel et des rapports de chantier. Les réunions avec notre tuteur, Mickaël Le Vern, nous ont, elles, permis d'avoir une meilleure connaissance théorique de la mécanique des roches.

Après chaque étape, lors de nos réunions d'équipe, nous réalisons un compte-rendu de l'étape passée, mettant en avant ce qui avait été réalisé et ce qui restait à accomplir. Nous mettons ensuite à jour le calendrier en conséquence.

2) Difficultés rencontrées et solutions trouvées pour les surmonter

Lors de ce projet Etudiant-Entreprise, nous avons dû faire face à plusieurs difficultés que nous avons dû surmonter. Pour commencer, au moment de l'Atelier n°1 nous étions, il faut le dire, assez confus, pour ne pas dire dubitatifs, quant à la mission qui nous avait été confiée : "Développer une feuille de calculs pour calculer l'avancement du forage / coup de trépan avec une méthode scientifique" en s'appuyant sur les P2E passés... Venant juste de commencer le cours de MeMCo et ayant du mal à comprendre le cadre réel de notre sujet, les commentaires des camarades à qui nous présentions notre projet ce jour-là ne nous avaient pas rassurés. A la suite de ce temps d'échange, nous avons donc convenu de nous répartir assez précisément, et individuellement ou par groupe de deux, l'analyse un peu plus approfondie de ce dans quoi nous nous embarquions, conformément au planning que nous nous étions fixé.

En effet, il nous a fallu également un bon moment pour nous imprégner du sujet et de tout le vocabulaire très spécifique des travaux maritimes. Pour vaincre ces obstacles, en plus d'une répartition efficace des tâches, nous avons organisé des réunions régulières pour discuter des difficultés et des solutions potentielles, ce qui nous a permis de mieux comprendre la nature complexe du problème. De plus, le référent entreprise comme le tuteur ont été à l'écoute et disponibles pour répondre à toutes nos interrogations. De fait, de par cette organisation rigoureuse, nous avons pu partager efficacement notre avancement avec Alexandre Du Mortier, notre correspondant ETPO, et Mickael Le Vern, notre tuteur, afin qu'ils nous aiguillent et nous mettent en garde sur notre compréhension du problème.

Par exemple, notre travail de synthèse des hypothèses à particulièrement attiré l'attention d'Alexandre Du Mortier. En effet, après avoir échangé de longs appels téléphoniques avec un des proches d'un membre de l'équipe qui a longtemps travaillé sur des missions de trépanage, nous avons conclu que l'eau présente dans le pieu était négligeable. Après s'être renseigné, cette hypothèse a été écartée par Alexandre Du Mortier. Nous avons donc fait le choix de laisser ce paramètre accessible dans notre future feuille de calcul. De plus, alors que nous pensions à réaliser une interface de calculs qui soit compréhensible par tous, Monsieur Du Mortier nous a prévenus que celle-ci serait

uniquement utilisée par les ingénieurs en bureau d'étude et que, par conséquent, un tableur pouvait suffire.

La réunion suivante, avec notre tuteur Mickael Le Vern, nous a ensuite permis de clarifier des aspects techniques en appui des documents qu'il nous avait précédemment envoyés. A la suite de ces deux réunions et d'une mise au point au sein du groupe, nous avons conclu qu'il fallait nous concentrer sur l'étendue de la feuille de calcul à tous types de roches, à l'aide des données que nous pourrions trouver sur leurs caractéristiques. En effet, notre but est que les futurs utilisateurs puissent entrer dans la feuille de calcul et y introduire les valeurs qu'ils auront récupérées via les études géotechniques afin de bénéficier directement des résultats de notre travail.

En outre, nous avons décidé de diversifier nos méthodes d'analyse en combinant des techniques traditionnelles avec des approches innovantes, telles qu'une étude approfondie de la littérature existante et le recours à des experts externes pour nous conseiller. Enfin, nous avons maintenu une communication ouverte et transparente au sein de l'équipe pour rester concentrés sur nos objectifs communs en dépit des défis rencontrés.

Malgré ces obstacles, nous avons réussi à accomplir des progrès sensibles. En effet, nous avons réussi à clarifier le problème et à déterminer les actions nécessaires, ce qui constitue déjà une réussite en soi. De plus, nous avons mis en place une organisation efficace en actualisant un dossier partagé sur Google Drive, en répartissant les tâches et en utilisant un calendrier sur l'outil Trello, tout en maintenant une communication régulière au sein de l'équipe. Cette approche collaborative et méthodique nous a permis de surmonter les difficultés rencontrées et de progresser de manière significative dans notre projet. Finalement, la principale difficulté de ce P2E ne résidait pas dans l'organisation et la gestion de groupe mais plutôt dans la résolution scientifique du problème.

III- Hypothèses retenues et explications des équations

1) Hypothèses retenues

Nous présentons un tableau reprenant les hypothèses formulées par le groupe P2E28 l'année dernière et nos commentaires à leur sujet, ainsi qu'un tableau reprenant les hypothèses ajoutées par notre groupe cette année et leur source.

1. Trépan cylindrique	Hypothèse valable. Limite : Trépan complexe
2. Propagation de l'énergie avec dissipation dans la roche: modélisation du problème sous la forme d'un système ressort-amortisseur (raideur et potence dépendant de la nature du sol étudié)	Hypothèse valable : la roche dissipe l'énergie lorsqu'elle est frappée par le trépan et amortit l'impact. Ce comportement varie en fonction de la roche étudiée.

3. Hypothèse d'un matériau isotrope pour le calcul du tenseur des contraintes du sol	Hypothèse valable : nous considérons le massif rocheux comme un objet unique suffisamment homogène.
4. Hypothèse des petites déformations	Hypothèse valable : déformations très faibles
5. Hypothèse d'une force uniquement compressive normale au sol	Hypothèse valable : le trépan tombe parfaitement perpendiculairement au sol
6. Hypothèse d'une roche gneiss compacte	Limite: ne permet pas de généraliser les calculs à tous les types de roches
7. Négligement de la perte de vitesse lors du passage de l'air à l'eau	Hypothèse valable: les vitesses sont suffisamment faibles
8. S (degré de fissuration de roche) de 1 pour le gneiss compact (constante)	Limite: ne permet pas de généraliser les calculs à tous les types de roches
9. m_b de 7 pour le gneiss compact dans le cas d'une roche parfaitement conservée sans endommagement	Limite: ne permet pas de généraliser les calculs à tous les types de roches
10. Dissipation de l'énergie lors du changement de milieu air/eau	Hypothèse valable : la différence de viscosité entre les deux fluides est très élevée et j'ai donc des pertes d'énergie

Figure 3 : Hypothèses utilisées l'année dernière

1. Les caractéristiques des roches ne sont pas universelles : tous les paramètres sont liés à l'observation directe de leur état.	
2. La roche est supposée être dans le même état d'origine après chaque coup (les dommages permanents dus à chaque coup ne sont pas pris en compte).	

Figure 4 : Nouvelles hypothèses adoptées.

2) Explications et calculs (d'après groupe P2E 2022)

Modélisation de la chute et de l'impact du trépan

A. Equation différentielle du système, champ de déplacement

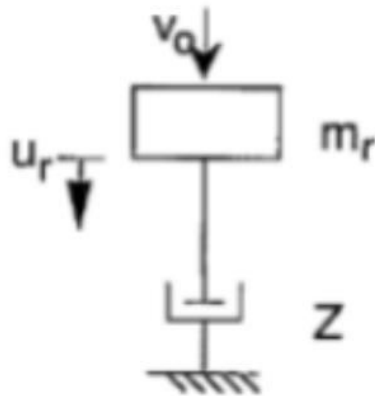


Figure 5 : Modélisation analytique de la chute du trépan sur le sol

Source : Deeks et Randolph, 1993

On modélise le sol par un amortisseur d'impédance équivalente $Z = \frac{E_p A_p}{c_p}$ associé à un ressort de raideur k .

On aboutit à l'équation différentielle du deuxième ordre à coefficients constants suivantes:

$$m_r \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + b \frac{\partial x}{\partial t} + kx = f.$$

Nom	Signification
$Z = \frac{E_p A_p}{c_p}$	impédance
E_p	module d'Young
A_p	surface d'impact
$c_p = \sqrt{\frac{E_p}{\rho}}$	vitesse axiale de l'onde
ρ	masse volumique du sol

$x = u_r + u_a$	déplacement
m_r	masse du trépan
b	potence de l'amortisseur
$f = Z \frac{\partial u_r}{\partial t}$	force à l'impact déterminée par l'ED sans avec amortisseur sans ressort

Figure 6 : Correspondance formules - signification

et sous forme canonique: $\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + 2\xi\omega_0 \frac{\partial x}{\partial t} + \omega_0^2 x = \frac{f}{m_r}$.

avec $\omega_0^2 = \frac{K}{m_r}$ la pulsation propre du système et $\xi = \frac{b}{2m_r\omega_0}$ le facteur d'amortissement.

1) Calcul de la solution de l'équation homogène $\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + 2\xi\omega_0 \frac{\partial x}{\partial t} + \omega_0^2 x = 0$:

Conditions initiales: $x(t=0) = x_0$ et $\frac{\partial x}{\partial t}(t=0) = x_0' = v(t_{impact})$.

Quatre cas sont possibles :

- $\xi = 0$, il n'y a pas d'amortissement
- $\xi > 1$, le mouvement est apériodique
- $\xi = 1$, le mouvement est apériodique critique
- $\xi < 1$, le mouvement est sinusoïdal amorti.

Ici, $\xi < 1$, le mouvement est donc sinusoïdal amorti.

Après résolution détaillée dans le rapport 2022, la solution est finalement:

$x_H = e^{-\xi\omega_0 t} (x_0 \cos(\Omega t) + \frac{x_0' + \xi\omega_0 x_0}{\Omega} \sin(\Omega t))$ avec $\Omega = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}$ la pseudo-pulsation propre.

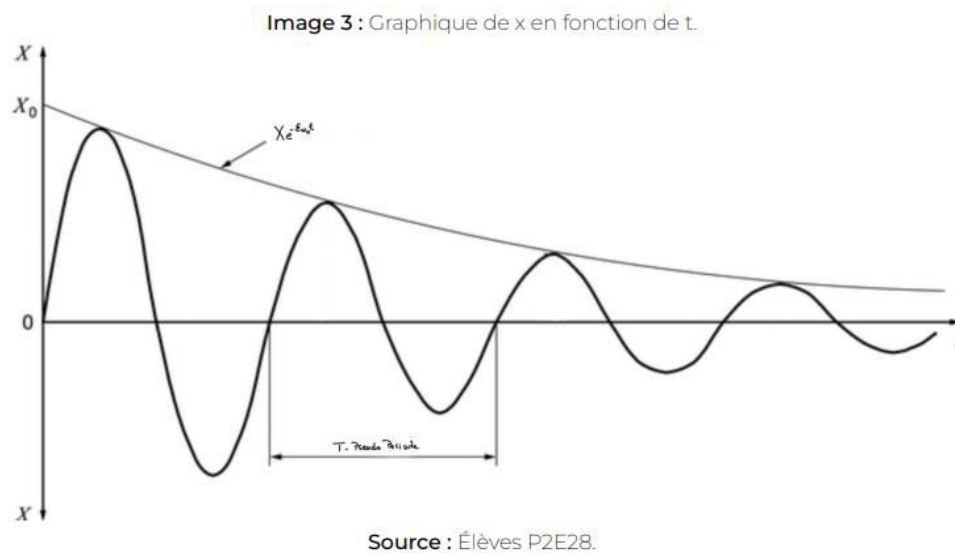


Figure 7 : Graphique de x en fonction de t

2) Calcul de la solution particulière

$$x_p = \frac{f}{m\omega_0^2} \text{ solution trouvée par la méthode de variation de la constante.}$$

La solution générale est la somme de la solution homogène et de la solution particulière soit:

$$x = e^{-\xi\omega_0 t} (x_0 \cos(\Omega t) + \frac{x_0' + \xi\omega_0 x_0}{\Omega} \sin(\Omega t)) + \frac{f}{m\omega_0^2}.$$

B. Champ de déformation

Tenseur des déformations sous l'hypothèse des petites déformations

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \frac{1}{2} (\underline{\underline{grad}} \underline{\underline{x}} + \underline{\underline{grad}} \underline{\underline{x}}^T)$$

En choisissant la loi de Hooke comme modèle de comportement, le tenseur des contraintes du sol est: $\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{H}} : \underline{\underline{\varepsilon}}$ avec $\sigma_{ij} = H_{ijk} \varepsilon_{kl}$.

On considère que le sol est un matériau isotrope, on a donc: $\underline{\underline{\sigma}} = \lambda \cdot \text{tr}(\underline{\underline{\varepsilon}}) \underline{\underline{I}} + 2\mu \underline{\underline{\varepsilon}}$.

Avec $\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ et $\nu = \frac{1}{2}$ le coefficient de Poisson.

Application du critère de Hoek-Brown pour déterminer la contrainte limite de résistance à compression du sol rocheux σ_{max} et donc le déplacement maximal (avancement du trépan)

$$\sigma_{1,ef} = \sigma_{3,ef} + \sigma_c \sqrt{\frac{m_b \sigma_{3,ef}}{\sigma_c}} + s$$

Nom	Signification
$\sigma_{1,ef}$ et $\sigma_{3,ef}$	contraintes principales majeures à la rupture
σ_c	contrainte de résistance à la compression de la roche
m_b	paramètre dépendant de la qualité de la roche
s	paramètre adimensionnel dépendant de l'état et du degré de fracturation du massif rocheux

Figure 8 : Correspondance formules - signification

En ne considérant que la compression, on a $\sigma_{1,ef} = 0$ et l'équation devient: $\sigma_{3,ef} +$

$$\sigma_c \sqrt{\frac{m_b \sigma_{3,ef}}{\sigma_c}} + s = 0 .$$

Puisque nous élargissons cette année le calcul à toutes les roches, nous ne pouvons plus prendre des valeurs particulières de m_b et s à ce moment de la résolution. Néanmoins, on peut toujours conclure que lorsque $\sigma_c > \sigma_{max}$, la déformation se situe dans le domaine plastique et x correspond à la profondeur creusée.

C. Force f transmise au sol telle que $\sigma_c > \sigma_{max}$

$$f = s \times \sigma_c \text{ et d'après l'énoncé par Michel (cf P2E 2022), } \vec{f} = -v\sqrt{km} \vec{e}_z$$

avec v: vitesse de chute

k: rigidité élastique du trépan

m: masse du trépan

D. Vitesse du trépan

Bilan des forces sur le système trépan:

- Poids $\vec{P} = m\vec{g}$
- Force de frottement linéaire: $\vec{f}_f = -k \cdot \vec{v}$ avec k: coefficient de frottement et \vec{v} : vitesse (du trépan)

On se place toujours dans le cadre de petites vitesses qui est valable car la hauteur de chute du trépan n'excède pas 10m (à vérifier cf mail M.Du Mortier) donc $k = 6\pi\mu r$.

Nom	Signification
$k = 6\pi\mu r$	coefficient de frottement
\vec{v}	vitesse (du trépan?)
μ	viscosité dynamique de l'eau
r	rayon du trépan (modélisé par un cylindre)

Figure 9 : Correspondance formules - signification

- Poussée d'Archimède, prise en compte car on considère que le trépan chute dans l'eau $\vec{\Pi} = -S\rho_{eau}h\vec{g}$ où h est égale à la hauteur d'eau si elle est inférieure et la hauteur du trépan mais est égale à la hauteur du trépan sinon.

Principe fondamental de la dynamique:

$$m\vec{a} = \vec{P} + \vec{f}_f + \vec{\Pi} = m\vec{g} - k \cdot \vec{v} - S\rho_{eau}h\vec{g}$$

Qui donne l'équation différentielle suivante en projetant selon l'axe vertical orienté vers le haut \vec{e}_z :

$$\frac{dv}{dt} - \frac{6\pi\mu r}{m}v = -g + \frac{S\rho_{eau}h}{m}$$

En sommant la solution homogène et une solution particulière, on trouve:

$$v(t) = \lambda e^{\frac{6\pi\mu r}{m}t} - \frac{S\rho_{eau}hg}{6\pi\mu r} + \frac{gm}{6\pi\mu r}.$$

Comme dans le rapport précédent, les frottements de l'air et la perte de vitesse lors du passage de l'air à l'eau ont été négligés.

Donc $v(t = 0) = \sqrt{2g(h_1 - h)}$ et ainsi:

$$v(t) = (\sqrt{2g(h_1 - h)} - \frac{gm}{6\pi\mu r} + \frac{S\rho_{eau}hg}{6\pi\mu r}) \times e^{\frac{6\pi\mu r}{m}t} - \frac{S\rho_{eau}hg}{6\pi\mu r} + \frac{gm}{6\pi\mu r} = \frac{dz}{dt}$$

On cherche la durée de chute c'est-à-dire t_1 le moment de l'impact.

On a $z(t = 0) = h$.

$$z(t) = \frac{m}{6\pi\mu r} (\sqrt{2g(h_1 - h)} - \frac{gm}{6\pi\mu r} + \frac{S\rho_{eau}hg}{6\pi\mu r}) (e^{\frac{6\pi\mu r}{m}t} - 1) - (\frac{S\rho_{eau}hg}{6\pi\mu r} - \frac{gm}{6\pi\mu r})t + h$$

et comme $z(t_1) = 0$, on a :

$$t_1 = \frac{m}{6\pi\mu r} \ln\left(\frac{S\rho_{eau}hg - gm}{6\pi\mu r(\sqrt{2g(h_1 - h)} - \frac{gm}{6\pi\mu r} + \frac{S\rho_{eau}hg}{6\pi\mu r})}\right) \text{ la durée de la chute du trépan.}$$

IV- Résultats

1) Calculs

DONNEES A ENTRER			
Données concernant la roche	Valeur	Autres données	Valeur
GSI (cf. tab1)	85 -	Masse trépan	4,00E+03 kg
Facteur de rupture D (cf. tab2)	0 -	Rayon cylindrique trépan	0,46 m
Constante de résistance mi (cf. tab3)	25 -	Hauteur de chute	2,00 m
Module de Young E	65 GPa	Hauteur eau	1,00 m
		Longueur trépan	6,00 m

Figure 10 : Données initiales pour un chantier à Saint-Nazaire le 18/11/2020

RESULTATS	
Condition de départ	Zone d'endommagement par coups
Si le trépan est lâché dans l'eau	1,62E-03 m
Le domaine d'étude est-il vérifié?	Oui

Temps de trépanage pour une profondeur donnée :		1,6 m
Dans l'eau	Durée en heures	1,1 h
	Durée en heures et en minutes	1h5min
	Nombre de coups nécessaires	988 coups

Figure 11 : Résultats théoriques obtenus pour un chantier à Saint-Nazaire le 18/11/2020

Hypothèses pour le calcul du temps de trépanage :

Afin de tester notre feuille de calcul, nous avons pris le cas du Gneiss et du chantier de Saint-Nazaire dont les données nous avaient été communiquées par l'entreprise. En effet, c'était la seule manière d'avoir des éléments de comparaison avec la réalité. Nous avons donc utilisé les caractéristiques du trépan du chantier de Saint-Nazaire (diamètre cylindrique, longueur). Pour obtenir une estimation du temps pour effectuer un coup de trépan et la hauteur de chute associée nous nous sommes basés sur une vidéo de trépanage pour le Quai Est à Concarneau (calcul avec un chronomètre pour le temps estimé à quatre secondes et repère visuel pour la hauteur de chute). Ces deux paramètres n'étaient pas disponibles dans le suivi de trépanage du chantier de Saint-Nazaire.

Analyse des résultats :

Nous observons un écart important entre le temps de trépanage réel, 10h25 pour le pieu n°5 du chantier de Saint-Nazaire (cf 612003 Excel Suivi trépanage) et le temps obtenu avec le tableur, 1h05. Cela est dû à de nombreuses incertitudes car les données récupérées sur chantier ne sont pas liées aux données extraites de la vidéo.

Nous n'avions pas la cadence de trépannage pour le chantier de Saint-Nazaire lors duquel ils ont utilisé un trépan qui n'a pas forcément les mêmes caractéristiques que celui de Concarneau. De plus, la vidéo montre bien que la hauteur de chute est variable d'un coup à l'autre ce qui peut aussi influencer le temps global d'un coup de trépan. Aussi, n'ayant pas la connaissance exacte du déroulé des travaux, il est possible que certaines étapes du trépanage aient été omises.

Ainsi, ces résultats contrastés ne sont pas nécessairement liés à des hypothèses de calculs imprécises mais bien à un manque de données nécessaires à la vérification de nos résultats.

Nous obtenons une profondeur de fissuration par coup de trépan qui semble cohérente au vu des informations données par l'entreprise. En effet, nos correspondants avaient estimé la profondeur de fissuration (avancée du trépan dans la roche) par coup de trépan à environ 1 mm. Cependant, au vu du temps réel de trépanage pour le chantier de Saint Nazaire cette profondeur reste incertaine.

2) Historique des modifications faites sur le tableur par rapport au P2E 2022

- Les équations pour le champ de déplacement ont été ajustées pour inclure les termes relatifs à x_0 , même si x_0 reste nul.

- Le coefficient de viscosité de l'eau a été modifié de 10^3 à 10^{-3} .
- La formule initiale de la vitesse à $t=0$, $2g(h)^{1/2}$, a été corrigée selon l'équation P2E à $(2gh)^{1/2}$.
- Un coefficient a été introduit pour réguler la poussée d'Archimède, différenciant les cas où la hauteur de l'eau est supérieure ou inférieure à celle du foret.
- La formule de vitesse dans le champ de vitesse a été corrigée pour utiliser la hauteur appropriée lors du calcul de la poussée d'Archimède.
- La méthode de résolution du temps dans le tableau du champ de vitesse a été ajustée après avoir découvert une incohérence dans l'approche précédente, nécessitant une résolution graphique avec Excel pour obtenir la valeur correcte du temps. L'utilisateur doit désormais saisir manuellement cette valeur à chaque modification des données.

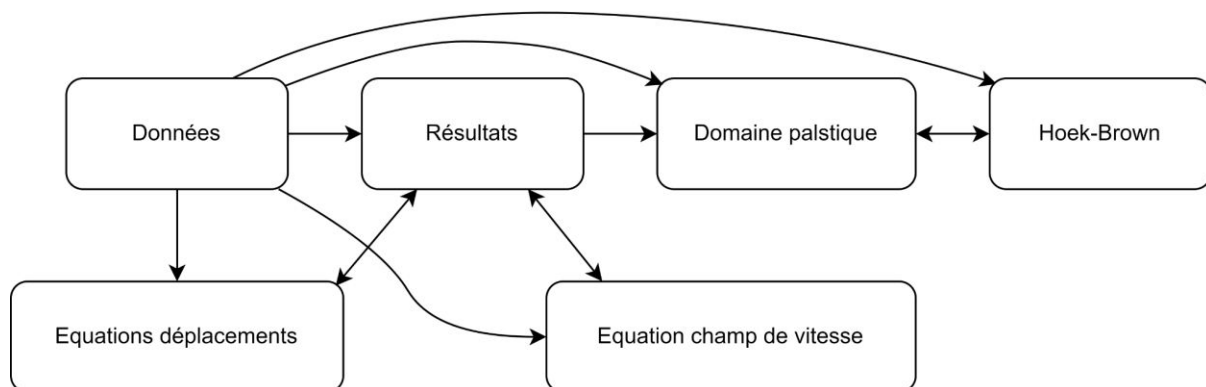


Figure 12 : Schéma expliquant l'interdépendance des données de la feuille de calcul

Conclusion

Lors de ce P2E, il nous avait été demandé de partir des résultats obtenus par les groupes des années précédentes afin de les élargir aux autres roches et de préciser les calculs.

Pour cela, nous avons précisé les hypothèses de départ et illustré le processus à l'aide de schémas pour créer une base de réflexion commune. Nous avons donc réussi à corriger la feuille de calculs et à la rendre plus simple d'utilisation.

Cette feuille de calculs apporte désormais des résultats supplémentaires concernant le temps de trépanage nécessaire pour une profondeur donnée.

Cependant, les résultats demeurent encore assez imprécis pour plusieurs raisons.

La première est liée au manque de données expérimentales qui rend difficile à tester les résultats théoriques obtenus. N'ayant pas pu aller sur un chantier, nous n'avons pas pu établir de méthodologie pour estimer les temps expérimentaux pour des données précises.

Une deuxième explication est liée au fait qu'il est difficile de modéliser le domaine rocheux. En effet, selon l'AFTES, il existe onze paramètres de classification d'une roche, ce qui rend difficile sa caractérisation physique car les études géotechniques préalables aux chantiers ne fournissent pas toutes ces informations.

Pour obtenir de meilleurs résultats, il faudrait donc coupler l'étude théorique avec un travail sur chantier afin de préciser les résultats expérimentaux et pouvoir les comparer aux données théoriques.

Remerciements

Tout au long de ce projet, nous avons été accompagnés par M. Alexandre Du Mortier, tuteur entreprise, et M. Mickaël Le Vern, tuteur école. Nous souhaitons les remercier chaleureusement pour leur aide et leur temps précieux et plus particulièrement pour les réponses éclairantes qu'ils ont su apporter à nos questions techniques ou théoriques.

Nous remercions également Mme. Catherine Michel, pilote P2E, pour ses conseils précieux sur l'organisation et pour le suivi bienveillant de notre projet.

Nous tenons enfin également à remercier Hubert Le Saux, contact d'un membre de l'équipe, dont l'expérience sur chantier a été précieuse pour notre compréhension initiale du sujet.

Bibliographie

- E. Hoek (2023). *Practical rock engineering*, CH 3 "Intact rock strength" et 5 "Rock mass properties" : <https://www.rocscience.com/learning/hoeks-corner>
- *Mission géotechnique G2 et G3, ETPO.*
- J.Y. Le Ven, M. Pernier (1979). *La conception et le calcul des quais sur pieux*
- M. Gasc-Barbier, D. Hanz (2019). *Mécanique des roches appliquée au Génie Civil*
- Vidéo d'un trépanage à Concarneau : <https://www.facebook.com/watch/?v=568355564113163>

- *Comportement mécanique des roches*: https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/baheddi-mohamed/files/chap_3_proprietes_mecaniques_des_roches.pdf
- Andrew J Deeks, Mark Randolph (1993). "Analytical modeling of hammer impact for pile driving" :
https://www.researchgate.net/publication/229485100_Analytical_modeling_of_hammer_impact_for_pile_driving
- Thèse de GADRI Larbi "Etude de la déformation et de la rupture des massifs fissurés par la méthode des éléments finis", Badji Mokhtar University - Annaba (BMUA), 2012
- Disturbance factor D:
https://help.geostru.eu/rocklab/en/fattore_di_disturbo_d.htm
- Méthodes de classification des masses rocheuses fracturées:
https://pastel.hal.science/file/index/docid/46627/filename/AnnexeD-methodes_de_classification.pdf
- Calcul des paramètres de Hoek-Brown <https://www.finesoftware.eu/help/geo5/fr/calcul-des-parametres-de-hoek-brown-01/>