

Préservons la Merveille de l'Occident

Le Mont-Saint-Michel (XI siècle), foyer spirituel et intellectuel, fut l'un des plus importants pèlerinages de l'Occident médiéval. Classé en 1979 au patrimoine mondial de l'UNESCO, il est aujourd'hui l'un des sites les plus visités au monde (3.5 millions de visiteurs par an¹). Mais chaque marée contribue à ensabler ce site exceptionnel. Les herbues progressent de 30 hectares par an et le continent se rapproche de la merveille.

Après 10 années d'études, on a lancé en juin 2006 la construction sur le fleuve Couesnon d'un barrage très particulier, qui doit utiliser l'énergie des marées à son avantage pour rétablir le caractère maritime de cette baie. D'autre part, la route digue datant de 1879 sera remplacée par un pont passerelle de 2.8 km qui n'empêchera pas la circulation de l'eau, sur lequel circulera une navette d'un débit maxi de 3000 passagers/heure. Fin des travaux en 2012. Coût 200 millions €, ce qui en fait l'un des plus grands chantiers d'aménagement du territoire en France.



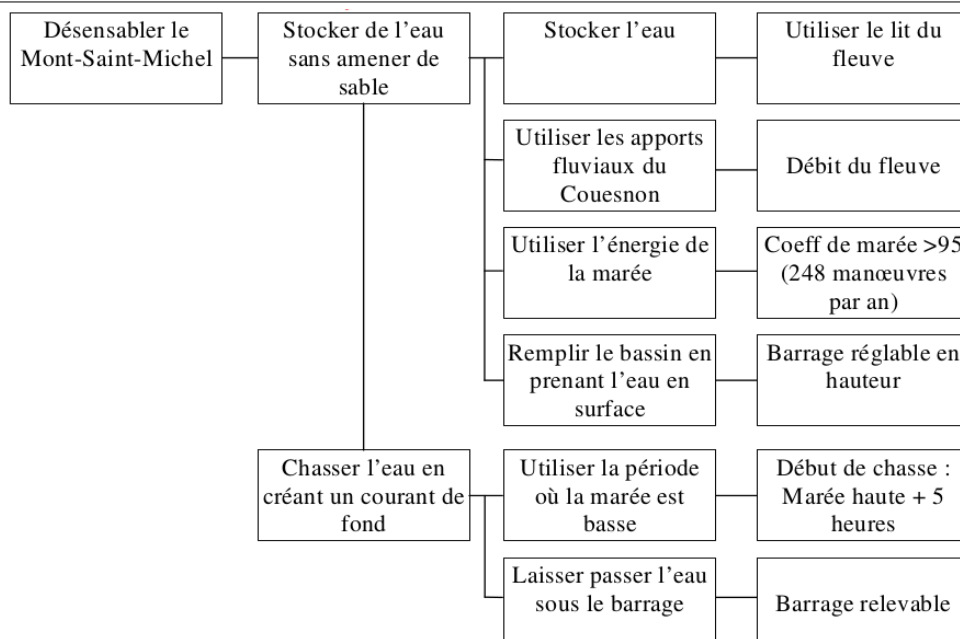
Vue du Mont-Saint-Michel et du fleuve Couesnon.
Sur la gauche, la future passerelle d'accès.



Vue du barrage sur le fleuve Couesnon.
Longueur 99.6 m composé de 8 tranches

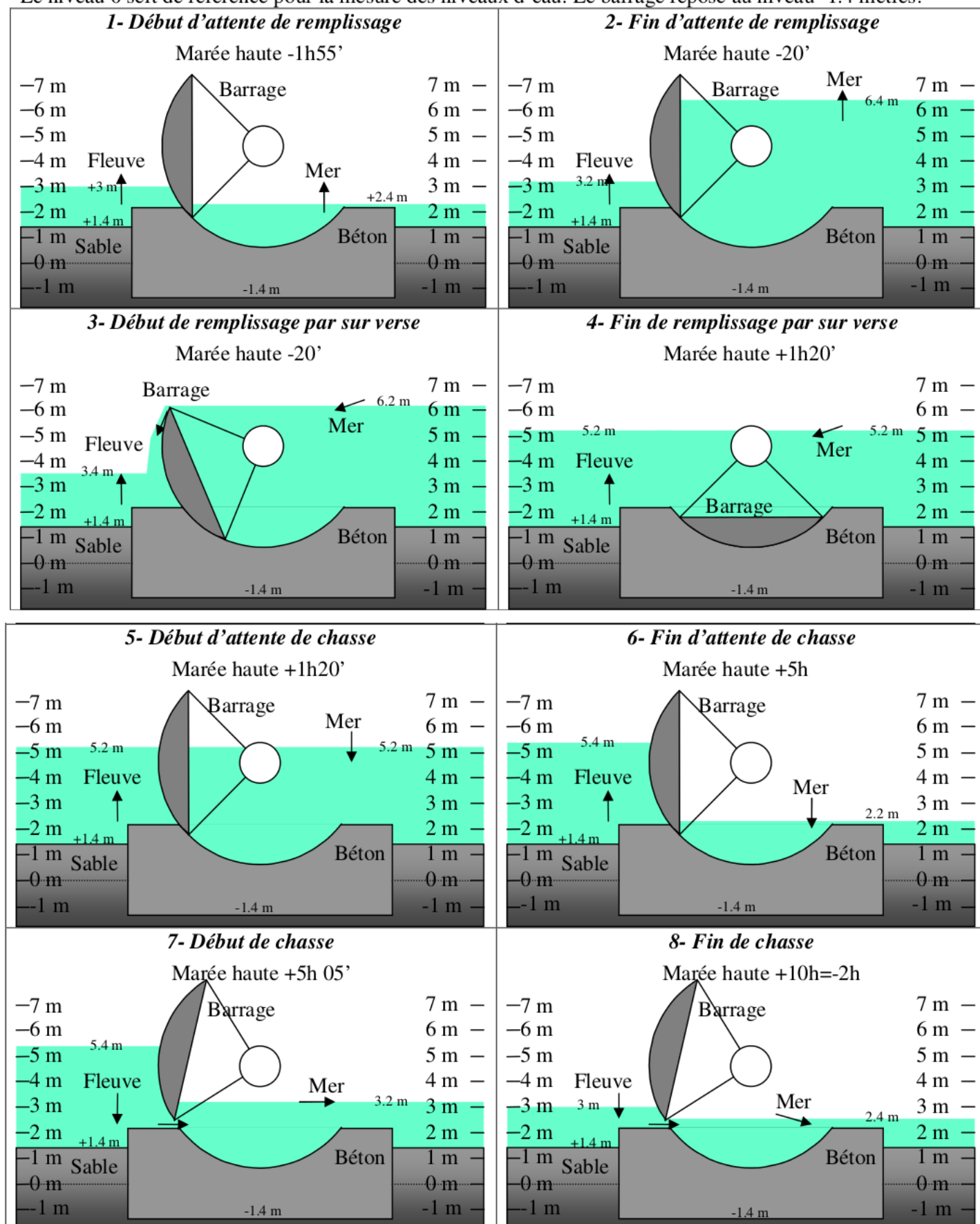
Objectifs de l'étude : Calculer les différentes actions mécaniques s'exerçant sur le barrage.
Vérifier que le barrage va résister à la poussée de l'eau.

1 Principe du désensablement



2 Technologie du désensablement

Le niveau 0 sert de référence pour la mesure des niveaux d'eau. Le barrage repose au niveau -1.4 mètres.



On remarque qu'il y a environ 1h35' d'ensablement (images 1 et 2) pour environ 8h40' de désensablement (images 5 à 8). Ce système va donc inverser le processus d'ensablement de la baie, qui devrait d'après les modèles réalisés être déblayée à 50% en 2 ans, et à 80% en 8 ans.

3 Première étude statique du barrage

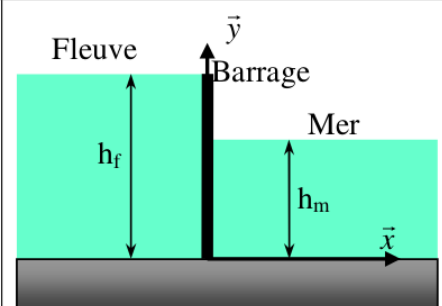
Hypothèse : Le barrage d'une longueur totale de $l=99.6$ mètres est composé de 9 piliers, délimitant 8 vannes secteurs manoeuvrées chacune par 2 vérins. Dans un but de simplification, on ne tiendra pas compte des piliers, et on considèrera que le barrage a la même forme sur toute la longueur.

3.1 Détermination de la poussée horizontale de l'eau.

Afin de calculer la poussée horizontale de l'eau sur la longueur l de barrage, on adopte le modèle ci-contre :

On donne :

$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, la masse volumique de l'eau
 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ l'accélération de la pesanteur.



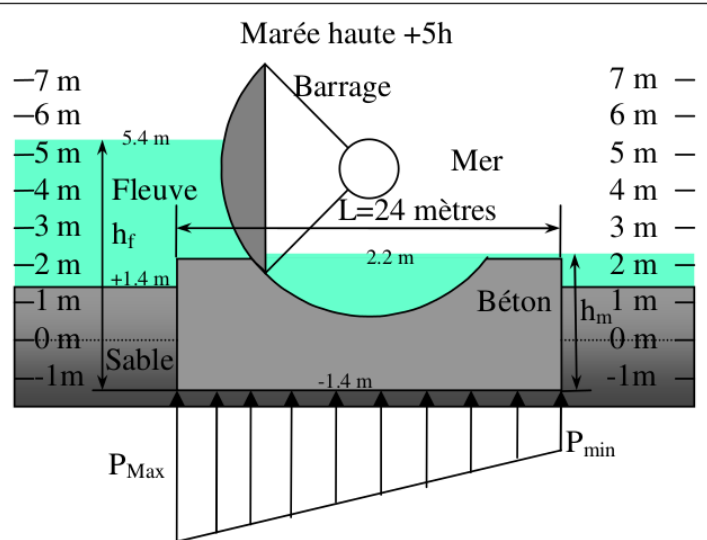
Question 1. : Déterminez en fonction de h_f et h_m l'expression de la poussée horizontale R_H de l'eau sur le barrage.

Question 2. : En prenant les niveaux d'eau sur les figures page 2 et en admettant que le sable est un milieu poreux (perméable), déterminez la situation pour laquelle la norme de la poussée horizontale de l'eau est la plus importante (précisez le numéro de l'image). Faire l'application numérique dans ce cas.

3.2 Détermination de la force de sous-pression

Le sable étant poreux, l'eau peut s'infiltrer sous le barrage et exerce donc une sous-pression verticale. Nous nous placerons dans la situation 6 : **Fin d'attente de chasse**. On adopte un modèle de répartition de pression triangulaire. A gauche, P_{Max} est la pression dans le fleuve, et à droite, P_{min} est la pression dans la mer.

Question 3. : Déterminez numériquement les pressions P_{Max} et P_{min} . En déduire l'expression de la résultante des forces de sous-pression R_{SP} en fonction de h_f , h_m , L , l ,...

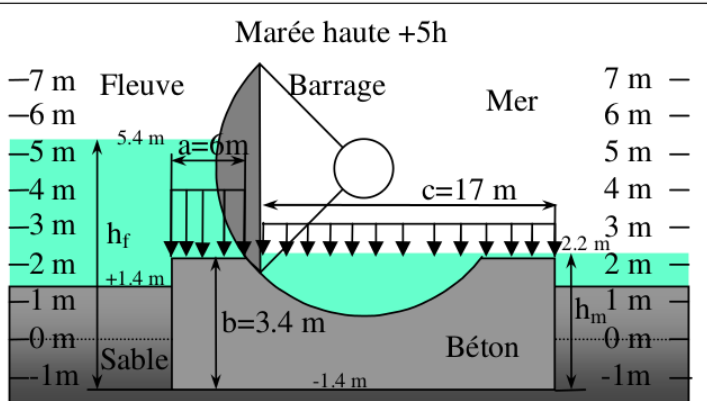


3.3 Détermination de la poussée verticale de l'eau

On se place encore dans la situation 6 : **Fin d'attente de chasse**. On néglige la forme cylindrique moulée dans la face supérieure du béton, et on considère que c'est un parallélépipède rectangle de dimensions $l \times L \times b$

Côté fleuve, la pression de l'eau sur la face supérieure du barrage est P'_f . Elle s'exerce sur toute la longueur l du barrage et sur une largeur $a=6\text{m}$.

Côté mer, la pression de l'eau sur la face supérieure du barrage est P'_m . Elle s'exerce sur toute la longueur l du barrage et sur une largeur $c=17\text{m}$.



Question 4. : Déterminez numériquement les pressions P'_f et P'_m . Déterminez l'expression de la poussée verticale R_V de l'eau s'exerçant sur la face supérieure du béton en fonction de P'_f , P'_m etc...

3.4 Equilibre du barrage

On se place encore dans la situation 6 : *Fin d'attente de chasse*

Le poids propre du barrage est $P_p = 1.65 \times 10^8 \text{ N}$.

La poussée horizontale de l'eau est $R_h = 1.63 \times 10^7 \text{ N}$

La résultante des forces de sous-pression est $R_{sp} = 1.22 \times 10^8 \text{ N}$

La poussée verticale de l'eau s'exerçant sur la face supérieure du béton est $R_v = 2.66 \times 10^7 \text{ N}$

On considère que le barrage est posé sur le sable. Le coefficient de frottement entre le béton et le sable est $\tan \varphi = 0.2$

Question 5. :

- 1 Déterminez numériquement $N_{S \rightarrow B}$, la composante normale de l'action du sable sur le béton.
- 2 Déterminez numériquement $T_{S \rightarrow B}$, la composante tangentielle de l'action du sable sur le béton.
- 3 Montrez que le barrage ne peut pas être en équilibre.

4 Seconde étude statique du barrage

4.1 Présentation

On se place encore dans la *situation 6 : Fin d'attente de chasse*.

Pour résister à la pression de l'eau, on a décidé d'ancrer le barrage dans le sol à l'aide de 210 pieux en acier et de deux murs rideaux également en acier.

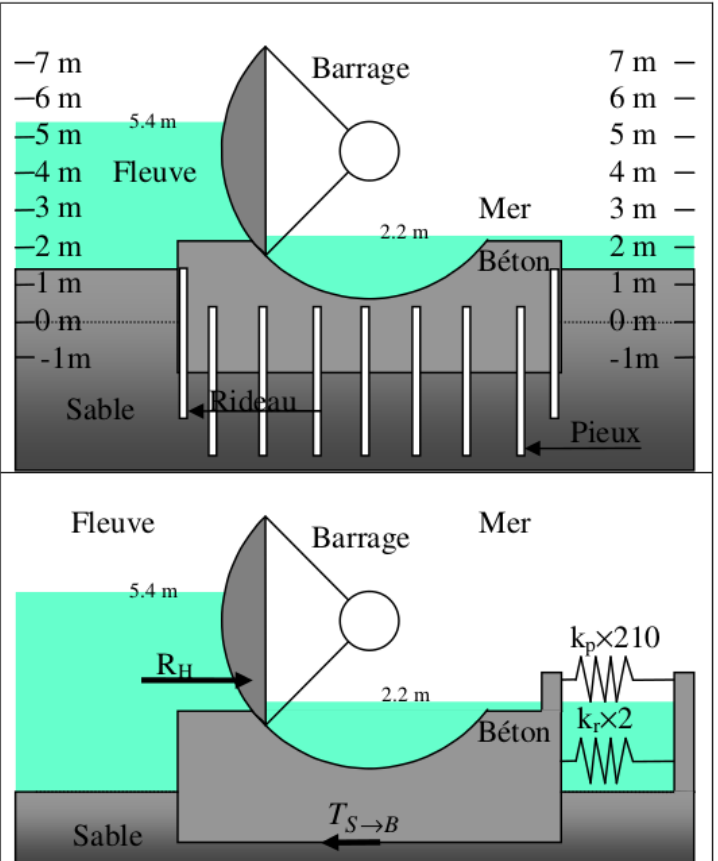
La fonction principale des murs rideaux est d'empêcher l'érosion du sable sous le barrage, mais ils participent à l'équilibre du barrage.

Remarque : En réalité, les pieux sont enfoncés dans le sol jusqu'au niveau -11 m et les rideaux jusqu'au niveau -8 m. Cela n'apparaît pas sur la figure.

Malheureusement, le sol étant meuble et les pieux pas parfaitement rigides, ils se déforment. On a pu calculer que chaque pieu avait une rigidité $k_p = 4.73 \times 10^4 \text{ kN/m}$ et que chaque mur rideau avait une rigidité $k_r = 2.75 \times 10^6 \text{ kN/m}$

Quand il n'y a pas d'eau ni côté mer, ni côté fleuve, la flèche des ressorts est nulle.

On adopte donc le modèle ci-contre, où les pieux et les murs rideaux se comportent comme des ressorts.



La poussée horizontale de l'eau est donc équilibrée à la fois par les pieux, les rideaux et $T_{S \rightarrow B}$ (la composante tangentielle de l'action du sable sur le béton). Pour calculer les pieux, on adopte un coefficient de sécurité de 4 sur le coefficient de frottement, c'est à dire que l'on prendra $\tan \varphi = 0.2/4 = 0.05$

Le poids propre du barrage est $P_p = 1.65 \times 10^8 \text{ N}$.

La poussée horizontale de l'eau est $R_h = 1.63 \times 10^7 \text{ N}$

La résultante des forces de sous-pression est $R_{sp} = 1.22 \times 10^8 \text{ N}$

La poussée verticale de l'eau s'exerçant sur la face supérieure du béton est $R_v = 2.66 \times 10^7 \text{ N}$

Question 6. : Etudiez l'équilibre du barrage. En déduire la valeur son déplacement d . En déduire l'effort F_p sur chaque pieux et F_r sur chaque rideau.

5 Résistance des matériaux

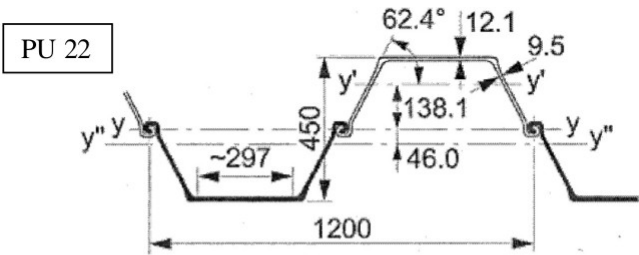
5.1 Moment quadratique des palplanches.

Chaque pieux est en fait constitués de deux palplanches PU 22 associées rigidement par 3.5 points de pînage par mètre.

La documentation ci-contre nous montre les palplanches PU22, produites en France par Arcelor.

Elles peuvent être utilisées seules (configuration S), par paire (configuration D), par trois (configuration T) ou en rideau continu.

On se propose de vérifiez les caractéristiques données par le fabriquant en adoptant un modèle approché.

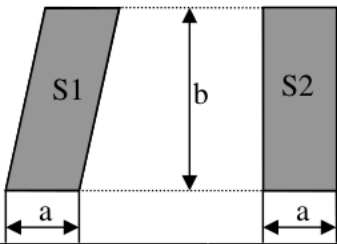


	Section	Masse	Moment d'inertie	Module de flexion élastique	Rayon de giration	Surface à traiter*
	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm	m ² /m
Par S	109.7	86.1	8740	546	8.93	0.90
Par D	219.5	172.3	59360	2640	16.45	1.79
Par T	329.2	258.4	82060	3025	15.79	2.68
Par m de rideau	182.9	143.6	49460	2200	16.45	1.49

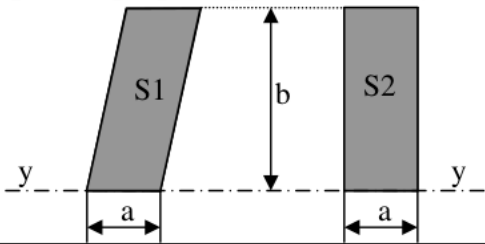
* 1 côté, intérieur des joints exclu
S = Palplanche simple: axe neutre = y'-y'
D = Palplanche double: axe neutre = y-y
T = Palplanche triple: axe neutre = y''-y'''

Question 7. :

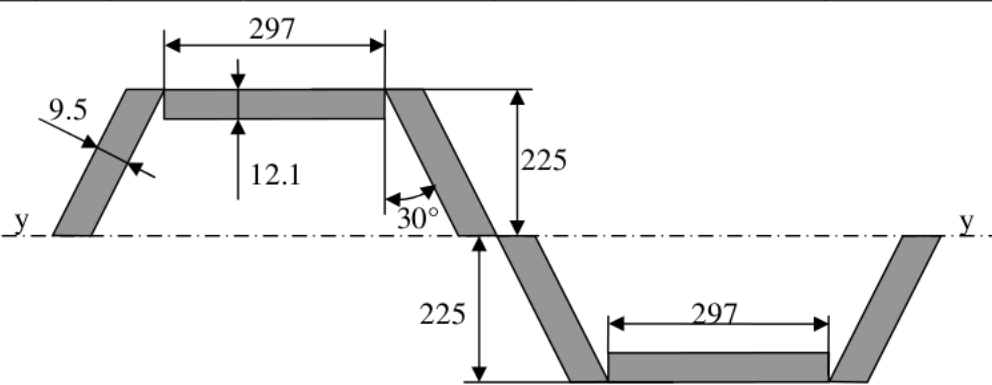
1. Montrez que les deux surfaces ci-dessous sont égales.



2. Montrez que les deux surfaces ci-dessous ont même moment quadratique par rapport à l'axe y-y.



Question 8. : En adoptant le modèle approché ci-dessous, calculez numériquement le moment quadratique et le module de flexion de la paire de palplanches par rapport à l'axe y-y. Comparer avec les données constructeur (on demande un résultat précis avec 4 chiffres significatifs).



Remarque Disposées ainsi, les palplanches s'appuient sur le sable sur toute leur longueur. Les deux palplanches sont inversées car la poussée horizontale de l'eau s'exerce alternativement dans un sens puis dans l'autre.

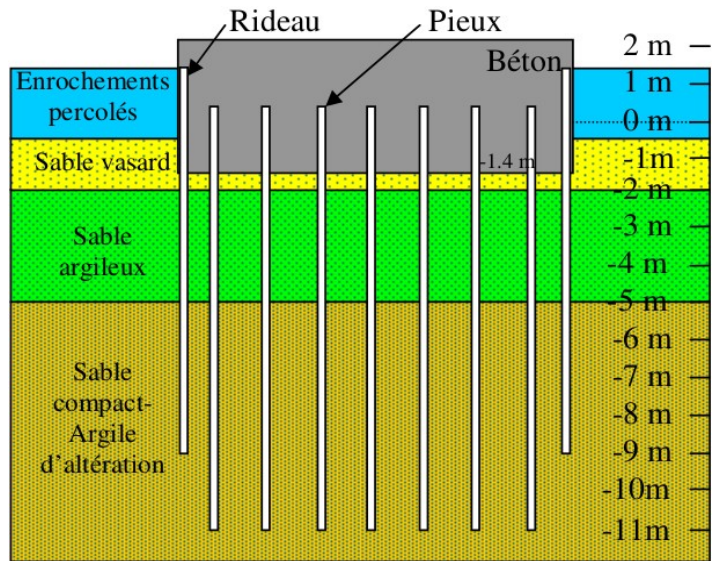
5.2 Calcul de la raideur des pieux

5.2.1 Présentation

Les palplanches sont enfoncées dans le sol jusqu'au niveau -11m.

- Du fond de la rivière jusqu'au niveau -0.5, le sol est constitué d'enrochements percolés. Il s'agit de pierres, posées sur le sol qui doivent éviter l'érosion du sable juste devant le barrage.
- Du niveau -0.5m au niveau -2m, on trouve du sable vasard (sable de plage).
- Du niveau -2m au niveau -5m, on trouve du sable argileux, un peu plus compact.
- Enfin, le terrain stable apparaît à partir du niveau -5m, où l'on trouve du sable compact.
- Les caractéristiques corrodées des pieux, qui sont inférieures aux caractéristiques calculées question 9 sont les suivantes :

$$I_{yy} = 42476 \text{ cm}^4 \quad E = 200\,000 \text{ Mpa}$$

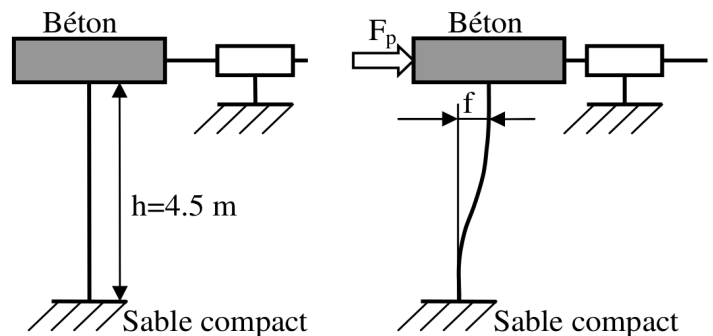


5.2.2 Première modélisation

Hypothèses Dans un premier temps, nous allons supposer que le sable vasard et le sable argileux est suffisamment souple pour n'exercer aucune action sur les palplanches.

On modélise donc le pieu comme une poutre de longueur $h = 4.5 \text{ m}$, encastree à ses deux extrémités, sur sa partie inférieure dans du sable compact et sur sa partie supérieure dans du béton.

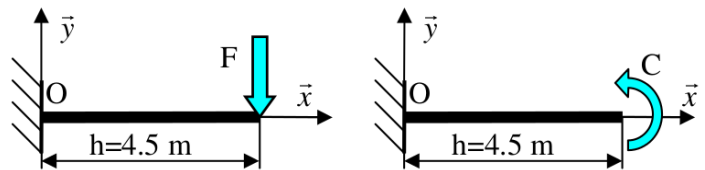
Sous l'effet de la force F_p , le béton translate horizontalement de la quantité « f ».



Question 9. : Etude préliminaire.

Dans les deux cas ci-contre, tracez le diagramme des moments fléchissant et des efforts tranchants.

Déterminez à chaque fois la flèche et la pente au point $x = h$ en fonction de la force F , couple C , du moment quadratique I_{Gz} et du module d'Young E .



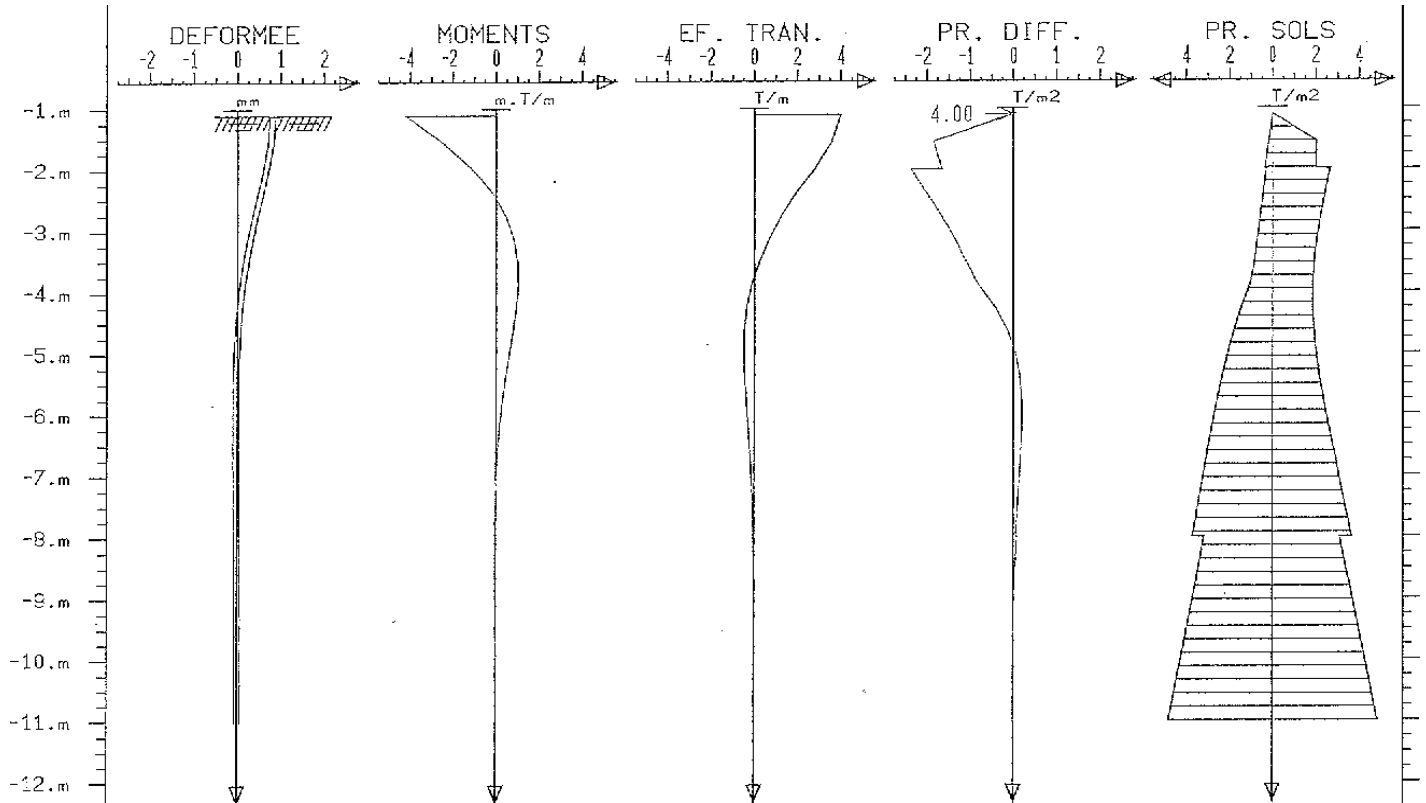
Question 10. : En appliquant le principe de superposition, et en admettant qu'il n'y a pas de compression sur les pieux, déterminez l'expression de la raideur k_p' d'un pieu. Faire l'application numérique et comparez à la valeur $k_p = 4.73 \times 10^4 \text{ kN/m}$ utilisée pour le calcul du barrage en statique. Conclure.

5.2.3 Seconde modélisation

Afin de tenir compte de l'action du sable vasard et du sable argileux sur le pieu, on a utilisé le logiciel RIDO qui permet de modéliser le sol. Les unités utilisées sont la tonne force (T), le mètre (m) et le millimètre (mm). On admettra $1 \text{ T} = 10^4 \text{ N} = 10 \text{ kN}$. Les résultats sont donnés page suivante.

Question 11. : Par une lecture sur les courbes, déterminez la flèche f , la force F et couple C présentés lors de la première modélisation. En déduire la raideur k_p'' d'un pieu, calculée par le logiciel RIDO. Conclure.

Question 12. : On se place toujours à la situation 6 : Fin d'attente de chasse. Calculez la contrainte maximum $\sigma_{6 \text{ Max}}$ dans les palplanches



Question 13. : La contrainte calculée précédemment correspond à la situation 6 : Fin d'attente de chasse. Mais il ne faut pas oublier que dans la situation 2 ; fin d'attente de remplissage, le barrage est sollicité dans la direction inverse et que cela engendre une contrainte maximum $\sigma_{2 \text{ Max}} = 18.2 \text{ MPa}$. On appelle « étendue de contrainte » la somme $\Delta \sigma = \sigma_{2 \text{ Max}} + \sigma_{6 \text{ Max}}$.

Le profilé que nous utilisons étant laminé soumis à des contraintes normales, la catégorie de détail est 160 (Euro code 3 partie 1-9) Déterminez le nombre de cycles admissibles par les pieux. Conclure.

