

BACCALAURÉAT SCIENTIFIQUE

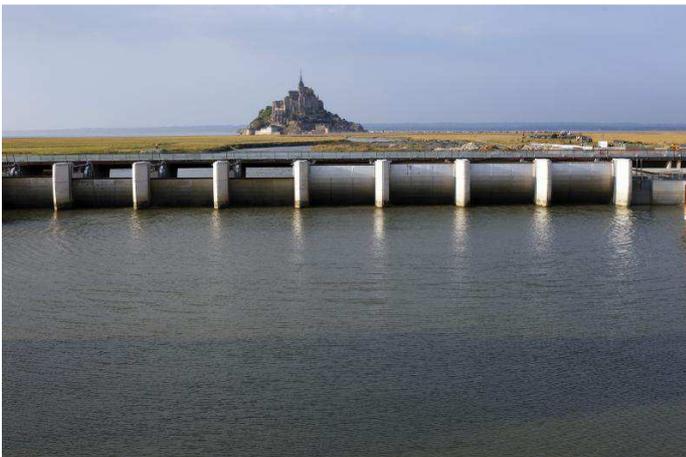
Épreuve de sciences de l'ingénieur

Sujet zéro (programme paru au J.O. du 28 août 2010)

Coefficient 6 – Durée 4 heures

Aucun document autorisé

Calculatrice autorisée



Rétablissement du caractère maritime du Mont-Saint-Michel

Constitution du sujet – version 1

- **texte** pages 2 à 18
 1. *Réponses au besoin*
 2. *Génération et régulation du flux hydraulique*
 3. *Modélisation du comportement structurel du barrage*
 4. *Analyse d'écart entre le souhaité, le simulé et le réalisé*
 5. *Conclusion sur la problématique du sujet*
- **documents techniques**..... pages 19 à 24
- **documents réponses**..... pages 25 à 27

Le sujet comporte 21 questions.

Les documents réponses DR1 à DR3 (pages 25 à 27) seront à rendre agrafés avec les copies.

Rétablissement du caractère maritime du Mont-Saint-Michel

Une opération d'aménagement touristique durable

Pourquoi un tel projet ?

« Le rétablissement du caractère maritime du Mont-Saint-Michel est une opération à vocation durable. Initiée en 1995 pour les études et débutée en 2005 pour les travaux, elle s'achèvera en 2015. Elle participe d'une grande ambition : **restaurer profondément le paysage qui sert d'écrin à l'un des hauts lieux de l'humanité et renouveler l'approche du site, dans l'esprit des traversées.**



Figure 1 : vue d'un Mont-Saint-Michel au caractère maritime rétabli

Le Mont-Saint-Michel est érigé dans une baie aux

paysages et aux écosystèmes remarquables. Ce site, d'une rare beauté, est consacré par une double inscription sur la liste du patrimoine mondial de l'Unesco (1979).

Ce chef-d'œuvre est aujourd'hui menacé. Au fil des siècles et des interventions humaines, la sédimentation s'est accentuée autour du Mont : poldérisation, réalisation de la digue-route, construction du barrage équipé de portes-à-flot... Petit à petit, la mer recule, terre et prés salés progressent. Un parking de quinze hectares au pied des remparts dénature le paysage maritime depuis plus de 50 ans.

Les experts internationaux sont formels. À l'horizon 2040, si rien n'est entrepris, le Mont-Saint-Michel s'ensablera irrémédiablement et sera entouré de prés salés. Cette transformation bouleversera de façon irréversible l'esprit du lieu voulu par les bâtisseurs de l'abbaye.

Pour éviter cela, un nouveau barrage utilise depuis 2009 la force des eaux mêlées de la marée et du fleuve (le Couesnon). Les résultats sont déjà perceptibles autour du Mont et



Figure 2 : barrage sur le Couesnon en action

confirmés par des mesures scientifiques régulières.

Cette reconquête des grèves imposera également en 2014/2015 de restituer à la nature les 15 hectares du parking maritime actuel mais aussi la digue-route qui relie l'îlot rocheux au continent et bloque les courants de marée depuis plus de 130 ans.

Grâce aux eaux de la marée et du Couesnon, les sédiments seront chassés au large. Le Mont retrouvera sa dimension maritime pour longtemps. »¹

¹ http://www.projetmontsaintmichel.fr/pourquoi_agir/objectifs.html

Barrage sur le Couesnon

Une étude prospective a conduit à la solution analysée dans ce sujet. Elle consiste en la construction d'un barrage sur le Couesnon à l'entrée de la baie du Mont-Saint-Michel (voir figure 3).

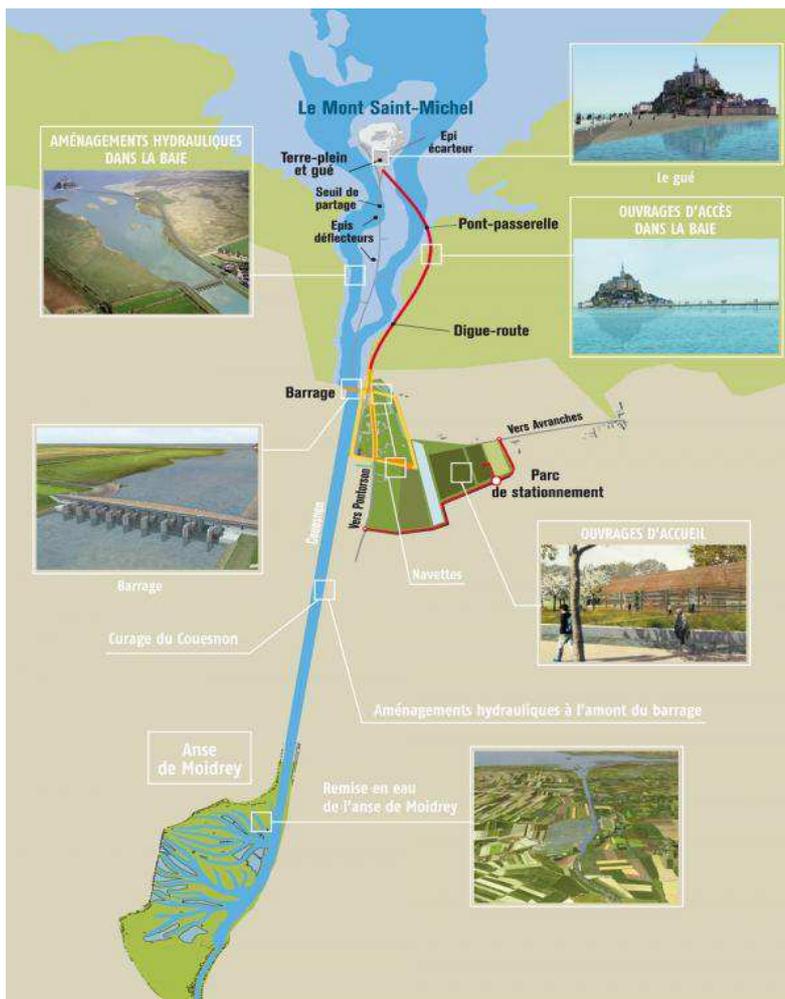
Cet ouvrage est constitué :

- d'une série de huit passes principales de 9 m de largeur ; ces huit passes identiques reçoivent le même équipement de vannes-secteurs mobiles actionnées en fonction de la marée pour permettre l'évacuation progressive des sédiments accumulés au fil des années autour du Mont-Saint-Michel ;
- de deux écluses à poissons (*non étudiées dans le sujet*), de 3,10 m de largeur chacune, intercalées entre les dernières passes et les culées² ;
- de deux culées de raccordement aux rives servant au logement de l'ensemble du matériel électrique, hydromécanique et hydraulique nécessaires à la commande des vannes mobiles, ainsi qu'au logement du matériel de contrôle, d'asservissement et de télégestion.

Le fonctionnement global du barrage est décrit dans la partie 2 du sujet.

L'étude proposée ici permet de vérifier que le barrage, opérationnel depuis 2009, répond à l'objectif général de son cahier des charges : **comment rendre puis pérenniser (opération durable) son caractère maritime au Mont-Saint-Michel, monument inscrit au patrimoine mondial de l'humanité, tout en respectant le paysage, la sécurité du site et les spécificités de la baie ?**

Plus spécifiquement, il s'agit de vérifier, à partir de mesures récentes effectuées, que les performances annoncées de l'ouvrage, répondant à cet objectif général, sont déjà effectives. Par ailleurs, le sujet aborde l'analyse d'écart entre des performances du cahier des charges, des résultats issus de simulations et certaines valeurs mesurées pour analyser et valider des choix. En outre, une étude d'éléments de l'ouvrage permettra de s'assurer que la sécurité est effective pour les personnes et l'environnement de la baie. Ces problématiques conduisent aux parties développées ci-dessous.



² Appui d'extrémité du barrage sur la berge

1. Réponses au besoin

Objectif de cette partie : analyser le besoin à l'origine de la conception du barrage et **comparer** la solution retenue avec une autre solution possible.

Avec une amplitude pouvant atteindre 16 mètres lors des plus grandes marées, le marnage³ observé sur la baie du Mont-Saint-Michel est parmi les plus importants du monde. La mer parcourt ainsi jusqu'à 15 kilomètres pour couvrir l'estran⁴ de la baie à la vitesse d'un cheval au galop comme le décrit la légende.

À l'heure actuelle, l'insularité du Mont n'est observée qu'une cinquantaine de jour par an lorsque les coefficients⁵ des marées dépassent 90. Pour revenir à la situation qui prévalait au début du XIX^e siècle, il s'agit de rendre au site son caractère insulaire au moins 180 fois par an, **soit à partir de marées ayant un coefficient 70.**

Coefficient de la marée	Hauteur d'eau référencée en IGN69 pour la pleine mer au Mont-Saint-Michel (en mètre)
50	+ 3,95
70	+ 5,10
90	+ 6,25
110	+ 7,40

Sur la figure 4 est donné un découpage des zones de niveaux référencées en IGN69⁶ sur un secteur circulaire arbitrairement choisi à 1 km de rayon.

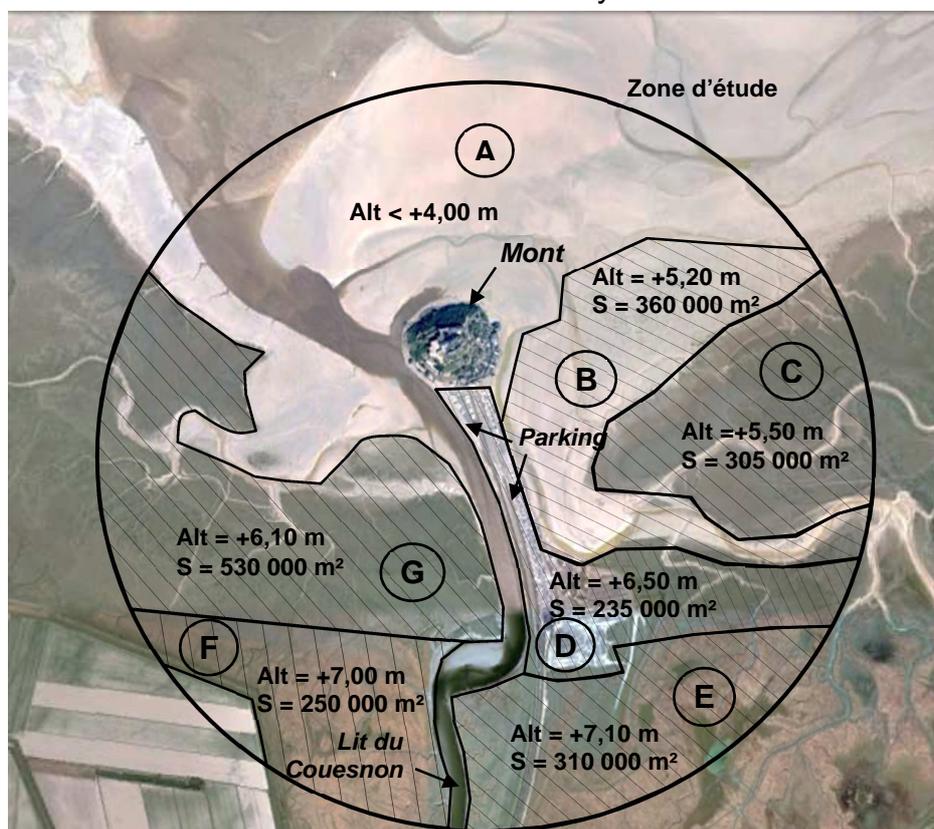


Figure 4 : découpage de zones autour du Mont-Saint-Michel à hauteurs différentes

Q1. Déterminer, en fonction des éléments donnés sur cette page, le niveau maximal de la cote des fonds qui permettra au Mont-Saint-Michel de retrouver son caractère insulaire au moins 180 jours par an. **En déduire** le volume de sédiment à déplacer pour satisfaire cette exigence dans la zone étudiée.

³ Dénivellation constatée entre une pleine mer (marée haute) et une basse mer (marée basse) successive.

⁴ Partie du littoral située entre les limites extrêmes des plus hautes et des plus basses marées.

⁵ Amplitude du marnage par rapport à sa valeur moyenne. Exprimé en centièmes, il évolue de 20 à 120.

⁶ Niveau zéro correspondant au niveau moyen de la mer observé par le marégraphe de Marseille sur la période de 1884 à 1897.

Impact environnemental du projet

La lutte contre le réchauffement climatique a débuté en 2005 avec l'entrée en vigueur du protocole de Kyoto imposant aux industriels des objectifs annuels de réduction des émissions de CO₂. Nous proposons de mener une réflexion sur l'impact environnemental de deux solutions envisageables pour répondre au projet de désensablement. Celui dû à une opération de dragage⁷ d'envergure d'une part puis celui engendré par la construction et par le fonctionnement du barrage d'autre part.

Ce n'est pas moins de **40 millions de m³** qu'il s'agit d'évacuer de la baie en vue de restituer au Mont son caractère maritime. Une extraction mécanique de ce volume a été jugée trop coûteuse et ne présentait pas l'avantage d'être une solution pérenne.



Figure 5 : vue future du Mont-Saint-Michel

Le projet actuel retenu se décompose en quatre actions principales :

- **construire un barrage** capable de réactiver et de renforcer le travail de chasse⁸ des sédiments par le Couesnon ;
- **remplacer la digue-route par un pont-passerelle** pour permettre une circulation des marées et du Couesnon autour du Mont-Saint-Michel ;
- **déplacer** les parkings aménagés aux pieds du Mont-Saint-Michel vers le continent ;
- **aménager** du lit du Couesnon par un dragage de **1,5 million⁹ de m³** afin de redonner au fleuve la capacité d'emporter les sédiments le plus au large.

Bilan carbone® de l'Ademe

Il s'agit d'une méthode globale de quantification des émissions de gaz à effet de serre générées par une structure ou par une activité. Cette quantification s'exprime en équivalent carbone (éqC) ou en CO₂ sur le cycle de vie du produit (conception, construction, exploitation et démolition).

Éléments chiffrés utiles à l'estimation simplifiée du bilan carbone :

- caractéristiques du barrage et des aménagements annexes
 - 20 000 m³ de béton,
 - 3 000 tonnes d'aciers (armatures et structures),
 - 600 MWh d'énergie électrique consommée annuellement ;
- 1 kWh d'énergie électrique produit en France émet 0,025 kg éqC ;
- un mètre cube de béton mis en œuvre émet 90 kg éqC ;
- une tonne d'acier mis en œuvre émet 500 kg éqC ;
- le dragage et le traitement d'un m³ de sédiment émet 0,8 kg éqC.

Q2. Estimer, pour un cycle de vie de 50 années, l'empreinte carbone des deux solutions envisagées pour répondre au projet de désensablement du site. Conclure cette partie en indiquant d'autres raisons qui ont conduit à retenir la solution du barrage.

⁷ Opération qui consiste à enlever les matériaux situés dans le fond des plans d'eau.

⁸ Rejet au large.

⁹ Ce volume inclut la suppression de la digue-route.

2. Génération et régulation du flux hydraulique

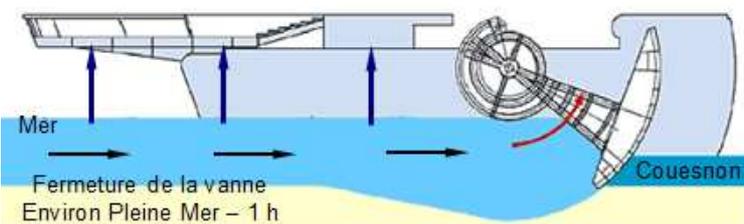
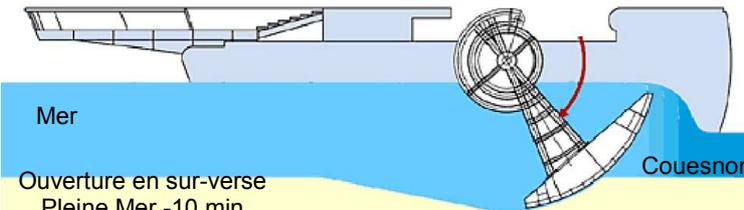
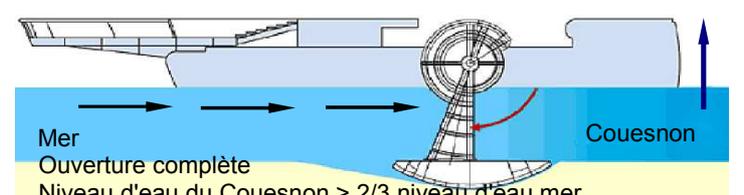
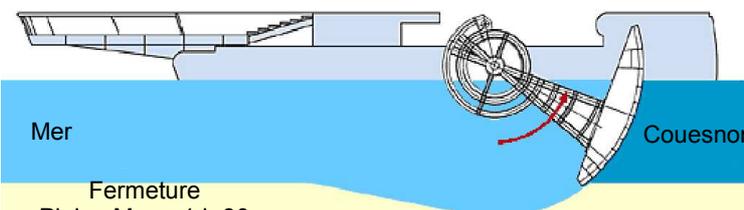
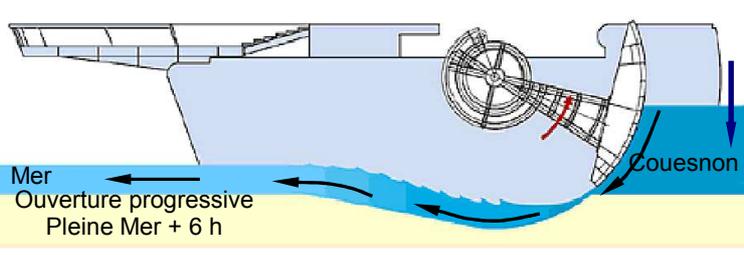
Objectif de cette partie : analyser la solution retenue pour créer et réguler un flux d'eau capable de repousser les sédiments au-delà du Mont-Saint-Michel.

Fonctionnement séquentiel du barrage

Afin de répondre partiellement ou totalement aux différentes fonctions de service du barrage, un système de huit vannes à fonctionnement séquentiel et asservi a été conçu pour provoquer un effet de chasse des sédiments.

Principe de l'effet de chasse (fonctionnement du barrage)

Les figures suivantes présentent le principe de chasse, la description est basée sur une période de marée de 12 h 25 min.

<p>Phase n°1</p>  <p>Mer Fermeture de la vanne Environ Pleine Mer - 1 h</p>	<p>Tout d'abord, environ 1 heure avant la pleine mer, les vannes sont fermées. Le premier flot bute sur l'obstacle et les sédiments se déposent en aval du barrage.</p>
<p>Phase n°2</p>  <p>Mer Ouverture en sur-verse Pleine Mer -10 min</p>	<p>10 minutes avant la pleine mer, les vannes s'ouvrent et la marée remplit le Couesnon par sur-verse (par le dessus les vannes) avec l'eau la moins chargée en sédiments.</p>
<p>Phase n°3</p>  <p>Mer Ouverture complète Niveau d'eau du Couesnon > 2/3 niveau d'eau mer</p>	<p>La marée entre dans le Couesnon jusqu'à une cote limite pour ne pas inonder les terrains en amont. À l'équilibre entre amont et aval, les vannes s'effacent. Les poissons migrateurs peuvent franchir le barrage.</p>
<p>Phase n°4</p>  <p>Mer Fermeture Pleine Mer + 1 h 30</p>	<p>Après 1 h 30 min, les vannes se ferment. Un débit réservé est assuré par les écluses à poissons qui permettent également la circulation des juvéniles d'anguilles.</p>
<p>Phase n°5</p>  <p>Mer Ouverture progressive Pleine Mer + 6 h</p>	<p>6 h après la pleine mer, les vannes retenant l'eau stockée dans le Couesnon sont progressivement ouvertes, provoquant une chasse régulée. Environ 3 h plus tard, la chasse régulée s'achève et les vannes sont fermées.</p>

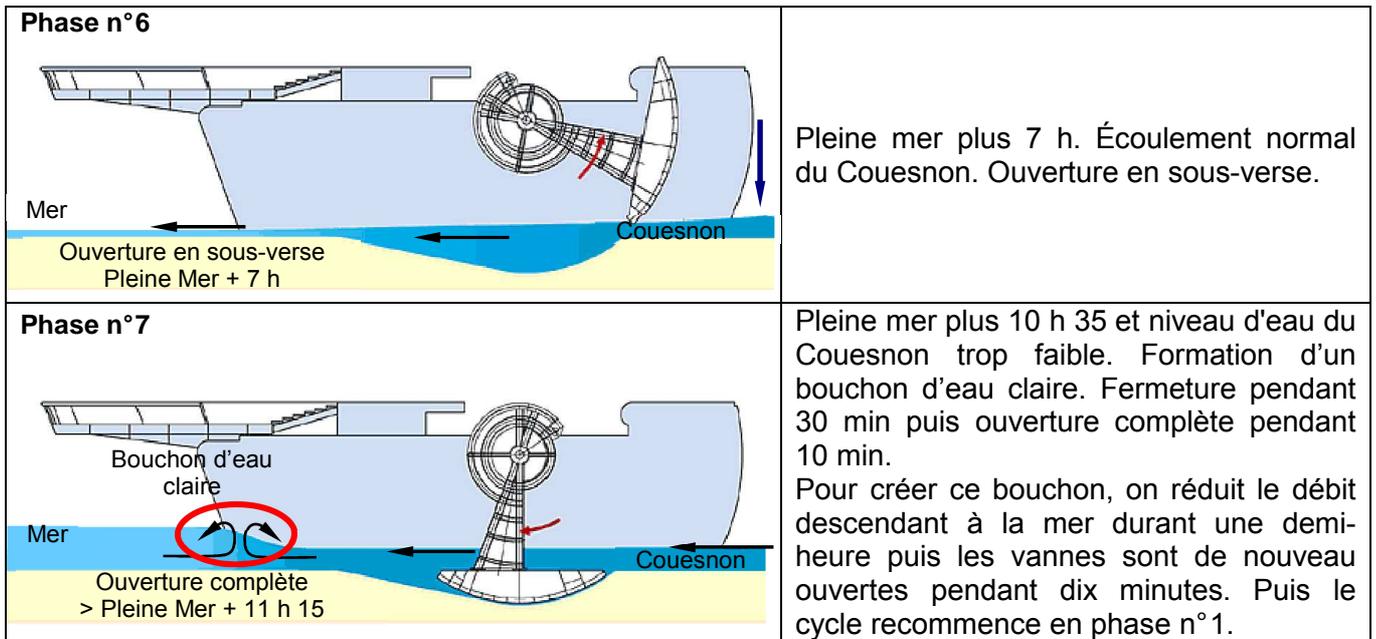


Figure 6 : phasage du fonctionnement du barrage

Q3. Le grafset du document réponse DR1 décrit le fonctionnement séquentiel du système. **Indiquer**, pour chaque étape, les numéros de phase correspondants sur ce même document réponse.

Adaptation du barrage au besoin

On note $R_0 = (O_0, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ le repère lié au barrage et pour lequel le point O_0 est tel que $y_{O_0} = 0$.

Pour la question suivante, on se placera au point de fonctionnement du barrage défini au cahier des charges pour caractériser ses performances attendues :

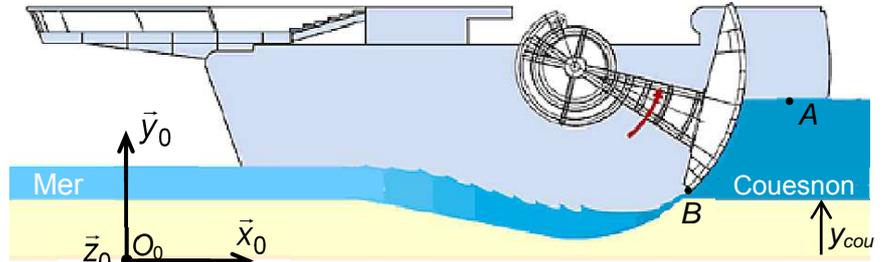


Figure 7 : coupe d'une vanne-secteur en position de sous-verse

- coefficient de marée, 95 ;
- hauteur du lit du Couesnon, $y_{COU} = 2 \text{ m}$;
- débit fluvial du Couesnon, $q_{COU} = 12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

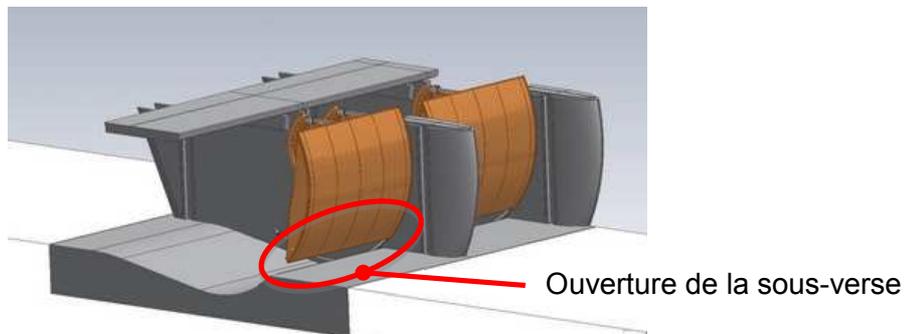


Figure 8 : maquette volumique en phase de sous-verse

Nous allons vérifier que la solution proposée permet d'atteindre le débit nominal de restitution (en sous-verse), $q = 100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ imposé par le cahier des charges.

On se place en phase de chasse (phase n° 5, sous-verse) comme le montre les figures 7 et 8. On note A un point de la surface du fleuve et B un point du fleuve tangent au nez de la vanne (voir figure 7). On rappelle que la largeur d'une vanne est $L = 9 \text{ m}$.

Pour un coefficient de marée de 95, l'altitude de la surface du fleuve peut varier entre 4 m et 6,5 m selon la saison. L'ouverture de la vanne est alors telle que $y_B = 2,236 \text{ m}$ pour l'altitude de 4 m et $y_B = 2,15 \text{ m}$ pour l'altitude de 6,5 m ci-dessus.

Un théorème de mécanique des fluides, permet d'écrire la relation suivante pour la vitesse d'un point B du fluide situé à la hauteur $y_A - y_B$ de la surface du fleuve :

$$v(B/R_0) = \sqrt{2 \times g \times (y_A - y_B)}$$

On supposera que la vitesse de tous les points du fluide dans la section ouverte en sous-verse est la même que celle de B .

Q4. Déterminer, en début de phase de sous-verse et pour chacune des deux hauteurs d'ouverture de la vanne définies ci-dessus, les valeurs numériques des débits de chasse. **En déduire** les valeurs de débit total du barrage pour une même ouverture des huit vannes. **Que peut-on conclure** concernant le débit supplémentaire dû au Couesnon en phase sous-verse ? Quel peut être son rôle ?

Les piles¹⁰ du barrage, au nombre de neuf (rappel, il y a deux culées), ont une longueur d'environ 25 mètres et une largeur d'environ 1,8 mètre. La partie amont d'une pile a une forme géométrique constituée d'une ellipse de petit axe égal à la largeur de la pile. Afin d'étudier l'intérêt de cette forme, trois simulations ont été réalisées pour mettre en évidence l'impact sur le flux hydraulique de trois formes du nez de ces piles (ellipse, rectangle, cylindre). Les trois figures du document technique DT2 montrent l'évolution du champ des vitesses de l'eau circulant du Couesnon vers la mer à une cote de 2 mètres du lit du fleuve. La vitesse des particules de fluide par rapport aux piles « à l'infini amont » est de 6 m/s.

Q5. Analyser les trois simulations du document technique DT2 et **proposer** un argumentaire validant le choix des ingénieurs sur la forme réelle des piles par rapport aux deux autres formes simulées. Il s'agit ici de **présenter** autant des arguments qualitatifs que quantitatifs.

Détection et codage de la position des vannes

Le caractère asservi du système de manœuvre de vannes contribue à satisfaire les contraintes hydrauliques définies par le programme de chasse. Ce type de commande rend nécessaire l'usage de codeurs de position angulaire de la vanne par rapport à la pile pour lesquels le choix technologique s'est porté sur des inclinomètres connectés à un bus CAN.

Chacun des bras supportant une vanne est instrumenté par un codeur de position angulaire et des capteurs TOR assurant la détection des fins de course de sécurité.

Position de la vanne	Capteur TOR associé	Angle (β)
Complètement ouverte	VO	-90°
Complètement fermée	VF	-20°
Ouverte en sous-verse	VSo	-10°

¹⁰ Massifs en béton entre lesquels les vannes sont positionnées.

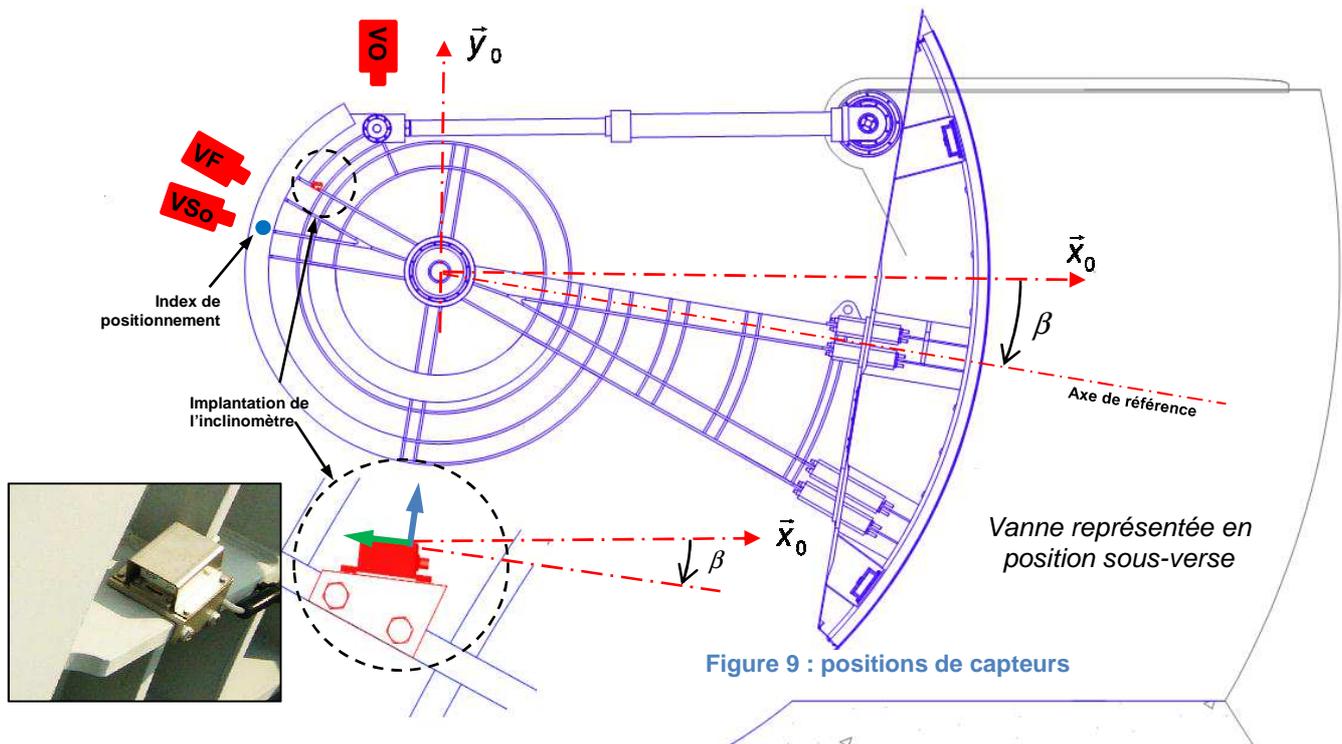


Figure 9 : positions de capteurs

Placé dans une zone non immergeable sur un support adapté, l'inclinomètre permet la mesure de l'angle β bien qu'il soit déporté de l'axe de référence. Ce codeur doit transmettre une valeur nulle lorsque la vanne est complètement ouverte et la valeur -80° pour une position en sous-verse.

- Q6.** Après avoir pris connaissance des éléments descriptifs du codeur utilisé sur le DT3, **compléter** le tableau de valeurs proposé du document réponse DR3 puis **choisir** la référence du produit le plus adapté à l'application parmi celles-ci :
- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 – NBA 65 - A 90 / 25 / 0 C3 | 2 – NBA 65 - S 25 / 0 / 90 C3 |
| 3 – NBN 65 - S 0 / 0 / 90 C3 | 4 – NBA 65 - A 0 / 0 / 90 C3 |

Le calculateur collecte sur le même bus les données issues des codeurs répartis sur l'ensemble de l'ouvrage. La longueur de ce bus CAN est **estimée à 200 m**, le pas de mesure **est défini à $0,01^\circ$ pour chaque codeur** .

- Q7. Compléter**, sur le document réponse DR3 et en utilisant le document technique DT3, les champs de données permettant la saisie de ce paramétrage.

L'oscillogramme de la figure 10 correspond à l'extrait d'une trame prélevée sur le bus CAN. On suppose que le plus petit intervalle de temps observé sur ce chronogramme correspond à la transmission d'un seul bit.

- Q8.** En se référant au document technique DT3 et sachant que cet extrait concerne le codage de la donnée de l'axe z d'un des inclinomètres, **identifier** :
- le débit utilisé sur cette ligne (en $\text{kbit}\cdot\text{s}^{-1}$) ;
 - la valeur de l'angle mesurée ;
 - la position de la vanne qui est associée à cette mesure.

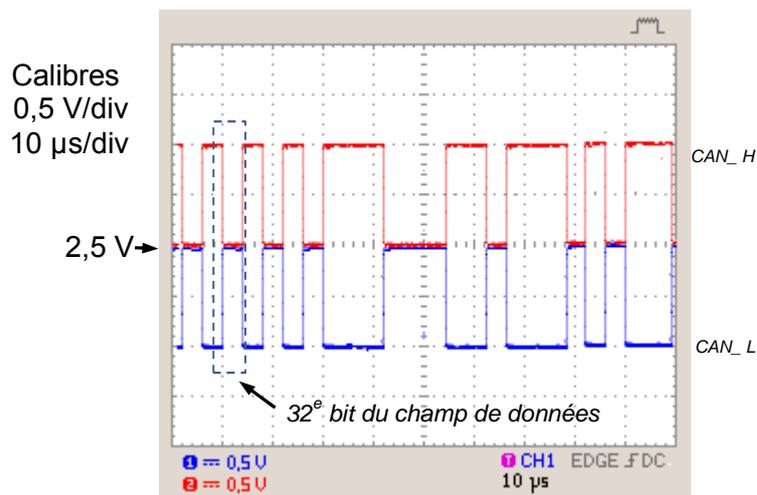


Figure 10 : oscillogramme d'une trame du bus CAN

Un programme permet de contrôler le positionnement de la vanne. Une consigne est fournie soit par l'opérateur si la vanne fonctionne en mode manuel soit par le programme si la vanne fonctionne en mode asservi.

Description des consignes

Complètement_Ouverte	La vanne doit s'ouvrir à son maximum (voir principe de chasse phase n°3).
Complètement_Fermée	La vanne doit se fermer (voir principe de chasse phase n°4).
Position_Sous-Verse	La vanne s'ouvre en sous-verse (voir principe de chasse phase n°6).
Angle_De_Position_Asservi	Une consigne de position est donnée, et la vanne est asservie à cette position (voir principe de chasse phase n°2 ou phase n°5).
Fin_Asservissement	Cette consigne permet de sortir du mode asservi.

Actions sur la vanne

Ouvrir_Vanne	La vanne est commandée en ouverture (rotation sens horaire).
Fermer_Vanne	La vanne est commandée en fermeture (rotation sens trigonométrique).
Asservir	La vanne est asservie à une consigne de position.

Q9. Compléter, en vous appuyant sur la description des consignes et des actions ci-dessus, l'algorithme du document réponse DR3 décrivant le fonctionnement partiel d'un système de manœuvre d'une vanne.

3. Modélisation du comportement structurel du barrage

Objectif de cette partie :

- **vérifier** le dimensionnement de la solution technique qui permet d'assurer le maintien en position des paliers de vanne sur les piles en béton ;
- **mettre en évidence** les contraintes dans le béton liées à cette solution.

La résultante de l'action mécanique d'un bras de vanne sur un palier de vanne est donnée ci-dessous.

$$\vec{R}(bras \rightarrow palier) = \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ 0 \end{bmatrix}_{(\bar{x}_1, \bar{y}_1, \bar{z}_1)} = \begin{bmatrix} -205000 \\ -113330 \\ 0 \end{bmatrix}_{(\bar{x}_1, \bar{y}_1, \bar{z}_1)} \quad (\text{daN})$$

Les valeurs des composantes de cette résultante sont directement issues d'une simulation numérique réalisée à partir d'un modèle multiphysique en se plaçant dans le cas le plus défavorable.

Chaque palier est maintenu en position sur la pile en béton par 6 tirants (voir document technique DT4).

Chaque tirant **6** se comporte comme un ressort de traction et transmet une action mécanique au palier de vanne **4** dans le but d'assurer son maintien en position.

Pendant toutes les phases d'utilisation du système, y compris les plus extrêmes, l'appui plan entre le palier de vanne **4** et la plaque intermédiaire de positionnement **5** doit être en permanence réalisé (voir figure 12).

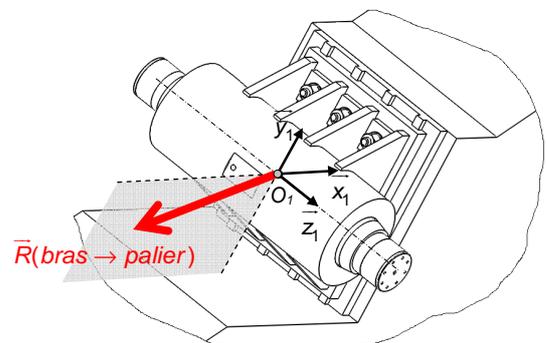


Figure 11 : action d'un bras sur un palier

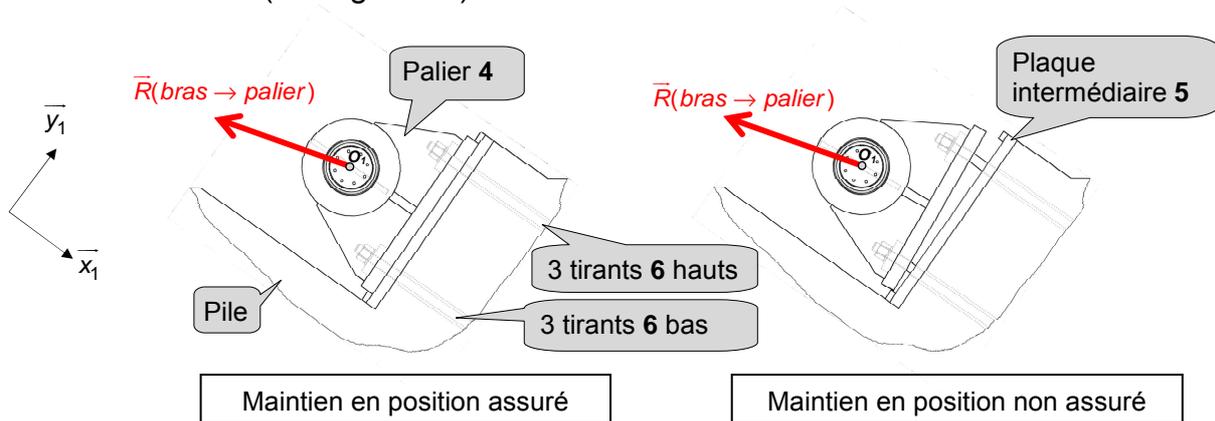


Figure 12 : maintien en position des paliers

Pour assurer ce maintien en position, les tirants **6** sont préchargés et transmettent chacun un effort au palier de vanne **4** (voir figure 13).

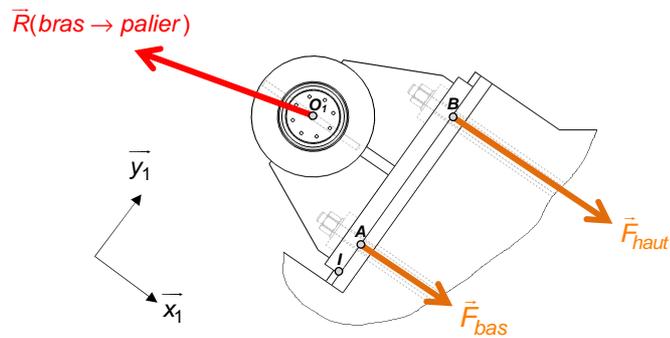


Figure 13 : précharge des tirants

Hypothèses

- on se place à la limite de la rupture de l'appui plan entre le palier de vanne 4 et la plaque intermédiaire de positionnement 5 ;
- toutes les pièces sont immobiles et sont considérées comme indéformables sauf les tirants 6 qui se comportent comme des ressorts de traction de raideur k ;
- le poids du palier est négligé.

Modélisation proposée

Dans une *première approche*, on propose de décomposer $\vec{R}(\text{bras} \rightarrow \text{palier}) = \vec{R}_x + \vec{R}_y$ (avec $\vec{R}_x = R_x \vec{x}_1$ et $\vec{R}_y = R_y \vec{y}_1$) et d'utiliser les modélisations ci-après. Le modèle 1 pour l'action suivant \vec{y}_1 , le modèle 2 pour l'action suivant \vec{x}_1 .

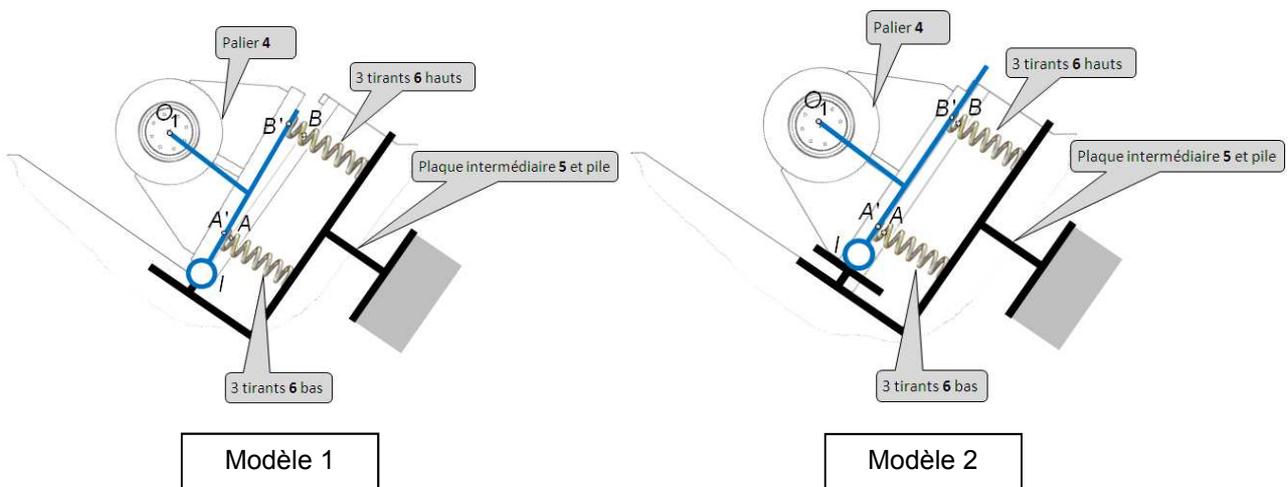


Figure 14 : modélisations d'un palier

L'isolement du palier de vanne 4 conduit alors à l'inventaire **partiel** des actions mécaniques extérieures suivant :

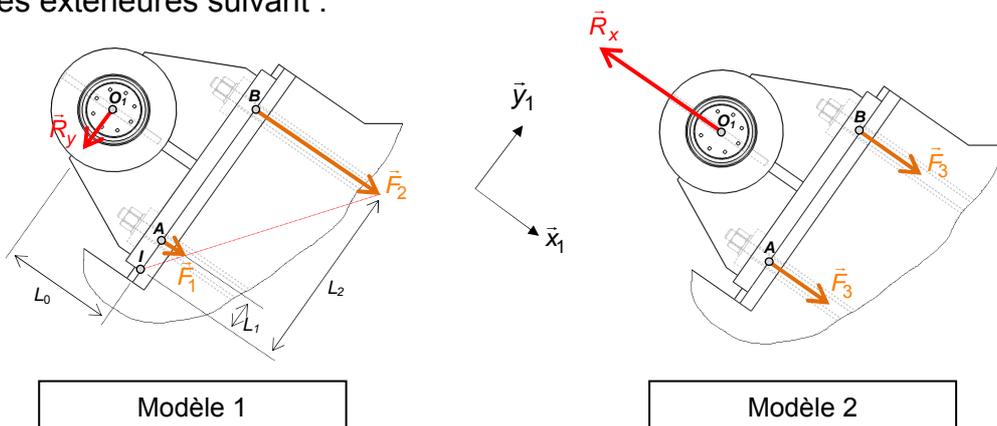


Figure 15 : inventaire partiel des actions mécaniques sur un palier

$$\vec{F}_{haut} = \vec{F}_2 + \vec{F}_3 \quad \text{et} \quad \vec{F}_{bas} = \vec{F}_1 + \vec{F}_3$$

avec $\vec{F}_1 = F_1 \vec{x}_1$, $\vec{F}_2 = F_2 \vec{x}_1$, $\vec{F}_3 = F_3 \vec{x}_1$ et $F_1 > 0$, $F_2 > 0$, $F_3 > 0$

Données : $L_0 = 830$ mm ; $L_1 = 270$ mm ; $L_2 = 1430$ mm

Q10. Justifier, à partir de la modélisation proposée en figure 14, la répartition linéaire de \vec{F}_1 et \vec{F}_2 proposée sur la figure 15. **Donner**, en utilisant le théorème de Thales, la relation entre F_1 , F_2 , L_1 et L_2 .

Q11. Calculer F_1 , F_2 et F_3 à l'aide de la relation déterminée à la question précédente et des :

- théorème du moment dynamique appliqué au palier du modèle 1 au point I et en projection sur \vec{z}_1 ;
- théorème de la résultante dynamique appliqué au palier du modèle 2 et en projection sur \vec{x}_1 .

Pour la suite on prendra : $F_1 = 12000$ daN, $F_2 = 63500$ daN, $F_3 = 102500$ daN

La précharge F appliquée sur chaque tirant est de l'ordre de $4,2 \cdot 10^6$ N.

Q12. Déterminer $\|\vec{F}_{haut}\|$ et $\|\vec{F}_{bas}\|$. **Conclure** sur la capacité de la solution technique retenue à réaliser la fonction « maintenir en position le palier de vanne » y compris dans des conditions extrêmes d'utilisation (crue du Couesnon, dépôt important de sédiment sur la vanne...).

La précharge F est susceptible, en particulier en position « vannes ouvertes », d'entraîner une pression de contact supérieure à la limite admissible par le béton entre la plaque intermédiaire de positionnement 5 et la pile en béton. En effet, dans cette position, la résultante de l'action mécanique des bras de vannes sur un palier de vanne ne permet pas de décharger les tirants (figure 16).

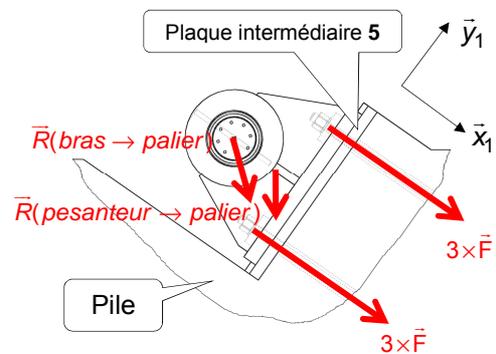


Figure 16 : cas des tirants non déchargés

Dans le but de vérifier la condition de résistance de la structure en béton en contact avec la plaque intermédiaire de positionnement 5, deux modèles de calcul sont utilisés.

Hypothèses et données communes aux deux modèles

- les 6 tirants se comportent comme des ressorts de traction avec une précharge $F = 4,2 \cdot 10^6$ N ;
- le poids du palier et la force résultante entre le bras et le palier sont négligés car leurs normes sont très inférieures à celle de l'effort de précharge ;
- la pression de contact maximale admissible par le béton est $p_{admissible} = 40$ MPa .

Premier modèle

Hypothèse

- toutes les pièces sont supposées indéformables ;
- la pression de contact $p_{contact}$ est répartie uniformément sur la surface d'appui $S_{contact}$.

Modèle

$$p_{contact} = \frac{6 \times F}{S_{contact}}$$

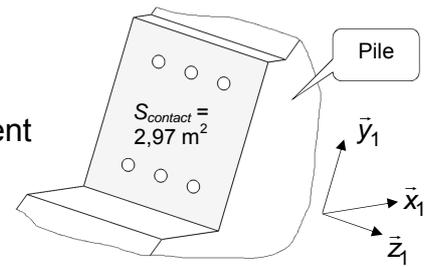


Figure 17 : surface d'appui du premier modèle

Second modèle

Les résultats du modèle sont obtenus par la méthode des éléments finis¹¹. La simulation numérique a permis de déterminer les valeurs des pressions de contacts palier/pile sur toute la surface de contact (figure 18).

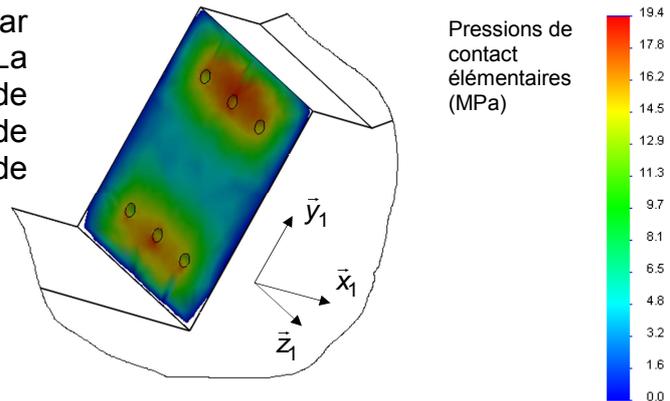


Figure 18 : répartition des pressions de contact du second modèle

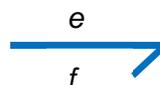
Q13. Calculer la pression de contact $p_{contact}$ à partir du premier modèle. Comparer le résultat obtenu avec le résultat du second modèle. Conclure quant au dimensionnement de la solution technique d'assemblage et quant à la validité du premier modèle.

4. Analyse d'écart entre le souhaité, le simulé et le réalisé

Objectif de cette partie : analyser des écarts entre les niveaux des critères mesurant la performance du barrage.

Analyse du modèle multiphysique

Afin de construire un modèle dynamique multiphysique du système de manœuvre d'une vanne-secteur, défini dans le document technique DT1, pour en réaliser une simulation et mesurer les écarts des performances anticipées par rapport à celles du cahier des charges et du système réel, une vue synoptique des chaînes d'énergie et d'information liées à chacune des 8 vannes-secteurs du barrage a été réalisée sur le document réponse DR2. Les constituants de la chaîne d'énergie sont reliés entre eux par un *lien de puissance* (demi-flèche) transportant les deux informations, effort e et flux f , dont le produit caractérise le transfert de puissance entre ces constituants. Quand on souhaite préciser les deux grandeurs précédentes sur un lien de puissance, la notation est la suivante :



¹¹ Méthode mathématique permettant de résoudre numériquement des équations.

Q14. Indiquer sur le document réponse DR2 les deux grandeurs *effort* et *flux* correspondant à la puissance transportée par chacun des liens de puissance. Les unités du système international de ces deux variables seront également précisées. Les zones en pointillés sont à compléter comme le montre le premier lien avec les variables U et I .

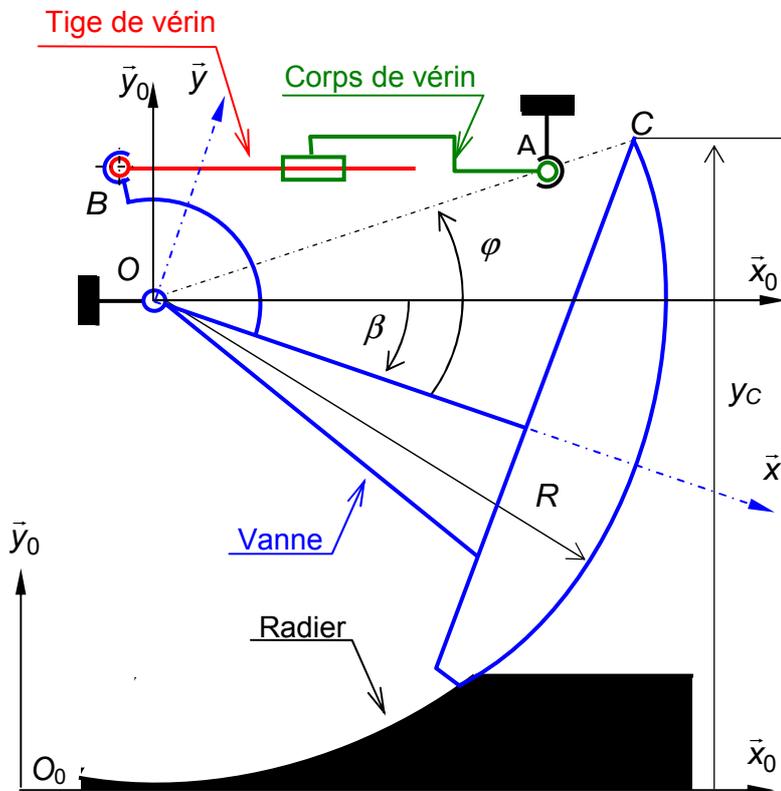


Figure 19 : hauteur d'une vanne

On rappelle que $R_0 = (O_0, \bar{x}_0, \bar{y}_0, \bar{z}_0)$ est le repère lié au barrage et pour lequel le point O_0 est tel que $y_{O_0} = 0$. La consigne du modèle multiphysique du document technique DT1 est la hauteur y_C de la vanne définie comme l'ordonnée du point C dans le repère R_0 (figure 19). La mesure réelle de la position de la vanne est réalisée par un inclinomètre mesurant l'angle β (figure 19). Dans le modèle, il a donc fallu indiquer au logiciel la relation entre l'angle β et la hauteur y_C . On précise les données géométriques de la vanne :

- ordonnée du point O dans le repère R_0 , $y_O = 7,5$ m ;
- rayon de la vanne $R = 7$ m ;
- angle de portion de vanne $\varphi = 38,25^\circ$.

Q15. Déterminer la relation entre la hauteur y_C de la vanne, l'angle variable β mesuré par l'inclinomètre, le rayon R de la vanne et l'angle φ à entrer dans le modèle du document technique DT1. **Donner** l'expression numérique.

La maquette numérique du système de manœuvre d'une vanne, réalisée à l'aide d'un logiciel de représentation assistée par ordinateur, a été importée directement dans un logiciel de simulation multiphysique. Le modèle lié à la dynamique d'une des huit vannes-secteurs du barrage est présenté sur le document technique DT1. Il a été construit à partir du synoptique étudié précédemment.

Q16. Justifier, à partir du document technique DT1, que ce système est asservi. **Préciser** la grandeur physique asservie sur le modèle.

Analyse des écarts lors d'une journée d'exploitation

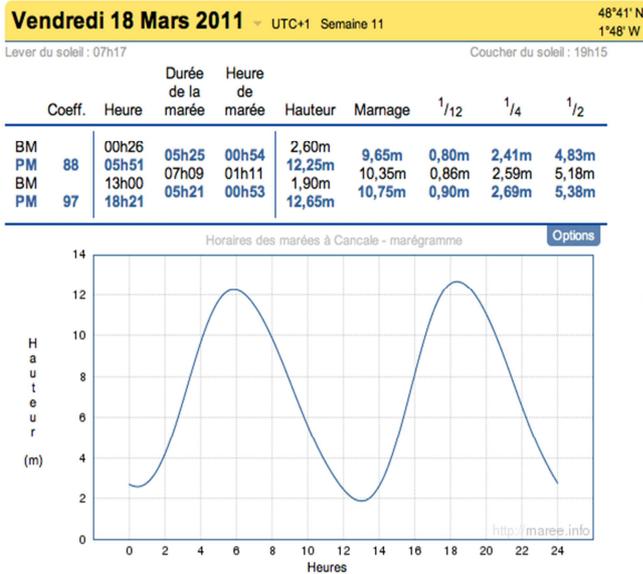


Figure 20 : horaire des marée le 18 mars 2011 au Mont-Saint-Michel

Nous allons analyser une journée particulière de fonctionnement du barrage correspondant approximativement au coefficient de marée (95) qui a servi à définir le cahier des charges : le 18 mars 2011. Il y a deux marées par 24 heures (figure 20). Nous ne nous intéressons ici qu'à la première marée comprise entre 4 h 19 et 16 h 42. Le document technique DT5 précise l'évolution des valeurs mesurées de cinq paramètres d'une vanne-secteur. Le tableau ci-dessous précise quelques critères du cahier des charges.

Rappels :

– le barrage contient 8 vannes-secteurs ;

– la relation entre le volume V et le débit volumique q est $V(t) = V(t_0) + \int_{t_0}^t q(\tau) d\tau$.

Critère	Niveau
1. Heure t_0 du début de sur-verse	PM - 10 minutes
2. Temps total de remplissage par sur-verse	1 h 30 minutes
3. Niveau du Couesnon en fin de remplissage	5,39 m
4. Niveau de remplissage par sur-verse	entre 5,90 m et 4,60 m
5. Volume d'eau apporté par la mer en sur-verse	979 040 m ³

Q17. Évaluer, à l'aide du document DT5, les écarts entre le souhaité (cahier des charges) et le réalisé (mesures) pour les 5 critères du cahier des charges énoncés ci-dessus. Pour le critère 5, on assimilera la figure formée par la courbe de débit en sur-verse et l'axe des abscisses à un triangle rectangle. Proposer des arguments permettant de justifier les valeurs de ces écarts.

Le modèle multiphysique d'une vanne-secteur a été réalisé à partir des caractéristiques des composants mécanique, électrique et hydraulique réels des chaînes d'énergie et d'information (voir le document technique DT1). Le modèle mécanique de la vanne (encapsulé dans le bloc « vanne-secteur ») a été conçu à partir des valeurs réelles (dimensions, matériaux). Ce bloc est relié aux deux vérins qui provoquent la rotation de la vanne comme le montre le document technique DT1. Afin de réaliser une simulation, il est nécessaire d'entrer dans le logiciel les paramètres caractéristiques des composants. En fonction du degré de précision recherché, le modèle peut être enrichi pour tenir compte de phénomènes négligés lors d'une première approche. Par exemple, pour un réducteur mécanique, le paramètre qui le caractérise est son rapport de transmission. Si l'on veut être plus précis, on peut aussi prendre en compte son rendement pour traduire les pertes d'énergie qu'il génère.

Q18. Indiquer les paramètres indispensables à renseigner dans le modèle pour simuler le comportement d'un des vérins. Donner d'autres paramètres pouvant rendre le comportement d'un vérin plus proche du réel.

Nous nous intéressons plus précisément à la première phase d'ouverture en sous-verse de la vanne-secteur le 18 mars 2011. Le graphique de la figure 21 présente les courbes de hauteur de vanne obtenues par la simulation du modèle multiphysique (document technique DT1) ainsi que celle mesurée sur le barrage (réel) entre 11 h 54 et 12 h 36 (voir document technique DT5) en mouvement de sous-verse.

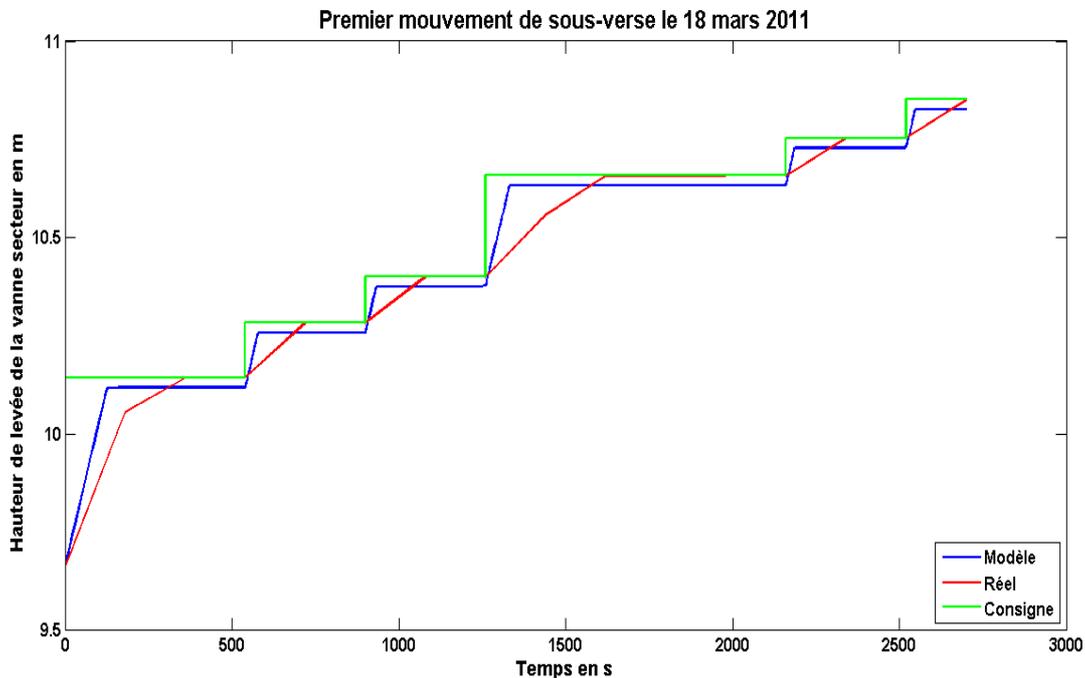


Figure 21 : mouvement de sous-verse d'une vanne le 18 mars entre 11 h 54 et 12 h 36

Q19. Analyser les différences entre les trois courbes. Quantifier les écarts obtenus lors de chaque palier du mouvement. Sur quel paramètre du modèle multiphysique (document technique DT1) peut-on agir pour régler le modèle ? Conclure sur la qualité du modèle.

5. Conclusion sur la problématique du sujet

Objectif de cette partie : proposer une synthèse du travail réalisé.

En moins de trois ans d'exploitation du barrage, les résultats attendus commencent à être effectifs. La figure 22 ci-après montre deux vues prises par télédétection laser¹² aéroportée permettant de réaliser une altimétrie précise.

Une étude permet d'estimer qu'une superficie de près de 1,5 km² devra être récupérée grâce à l'effet de chasse du barrage. Ensuite, cet effet de chasse entretiendra le rejet des sédiments pour éviter que ceux-ci ne recréent des zones émergées.

Q20. En considérant uniquement les effets sur les parties ayant une altitude de plus de 5 m, proposer une méthode d'estimation rapide de l'efficacité du barrage. Estimer la surface déjà passée sous l'altitude de 5 m entre le 12 février 2009 et le 18 avril 2011 pour la zone considérée. Conclure.

¹² Appelée également LIDAR, il s'agit d'une technique de mesure optique basée sur l'analyse des propriétés d'une lumière laser renvoyée.

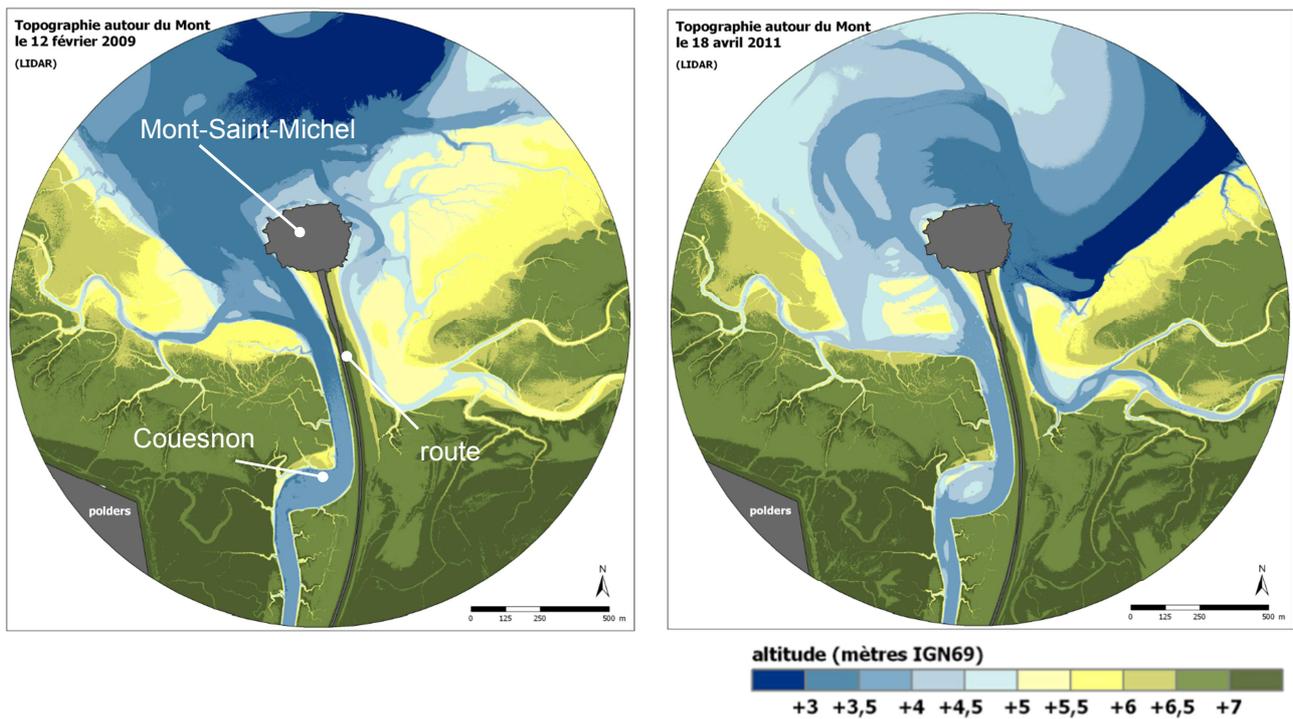
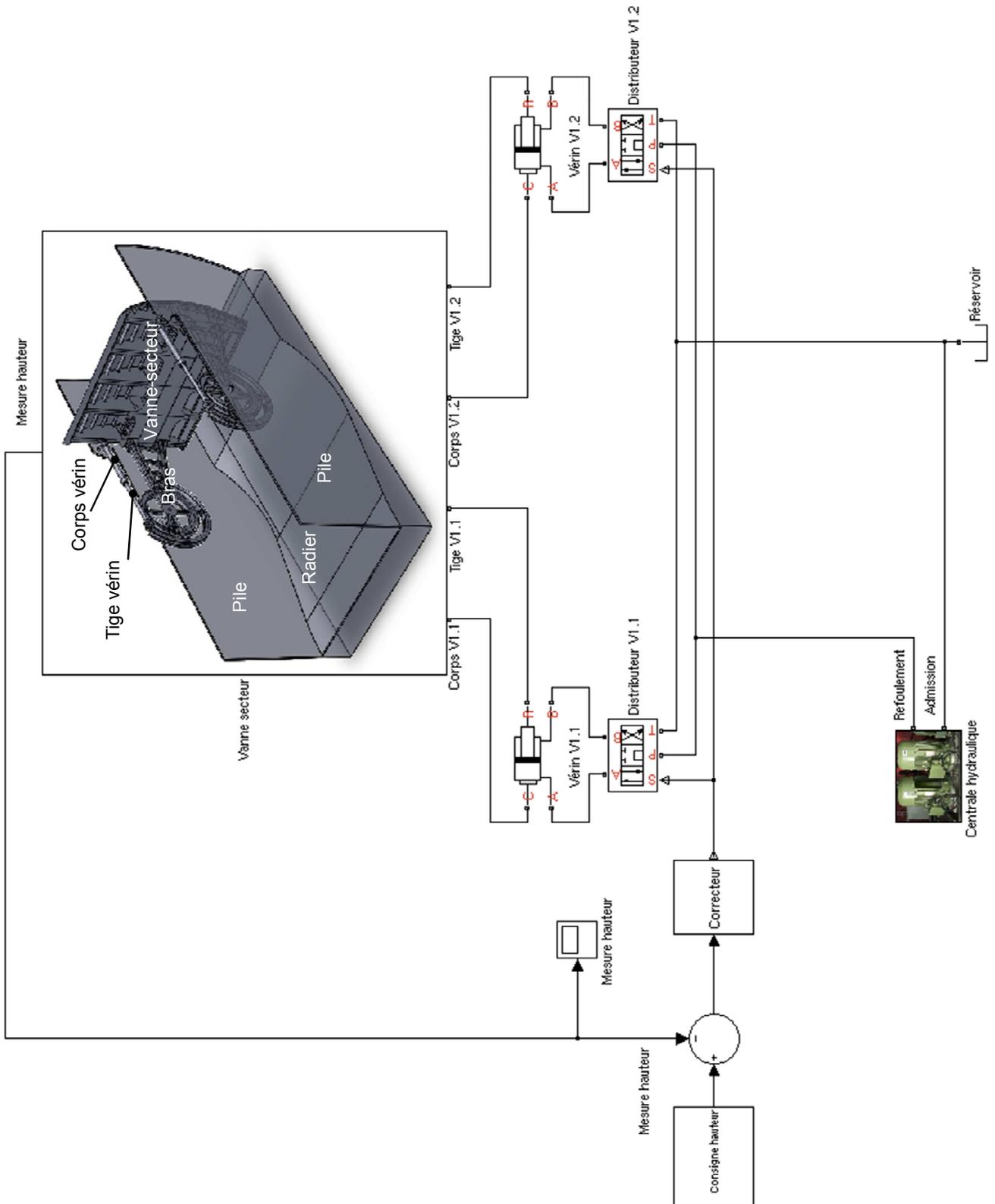


Figure 22 : photographies Lidar de la zone du Mont-Saint-Michel à environ trois années d'intervalle

Q21. Proposer, sous forme discursive (5 lignes au maximum), des arguments, à partir des résultats obtenus, pour **valider** le choix des concepteurs du projet par rapport à la problématique du sujet indiquée à la page 3.

Document technique DT1 : modèle multiphysique d'une vanne-secteur

Le bloc « vanne-secteur » encapsule le modèle numérique de l'ensemble mobile prenant en compte les paramètres le définissant (géométrie, masse, inertie, liaisons).

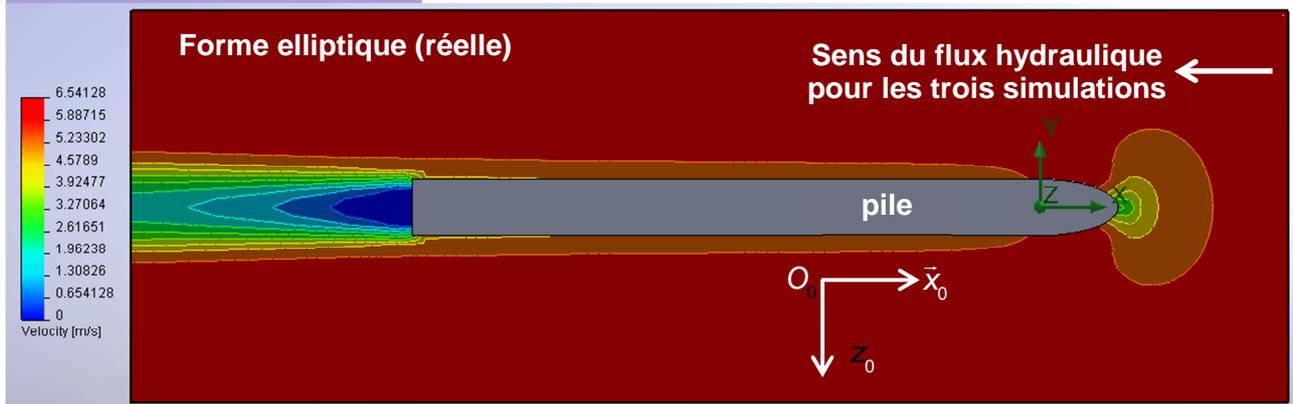


Document technique DT2 : simulation du flux hydraulique autour des piles

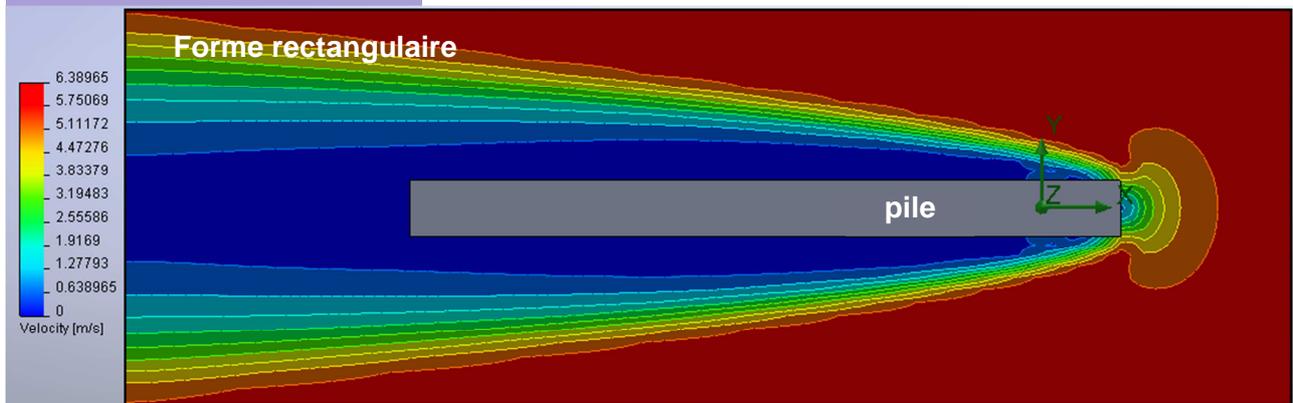
Simulation numérique du comportement de l'eau circulant autour d'une pile du barrage pour trois formes de nez différentes. La vitesse « à l'infini » de l'eau par rapport à la pile est fixée égale à $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et est dirigée de l'amont du fleuve vers les piles suivant l'axe (O_0, \bar{x}_0) .

- forme elliptique (réelle) ;
- forme rectangulaire ;
- forme cylindrique.

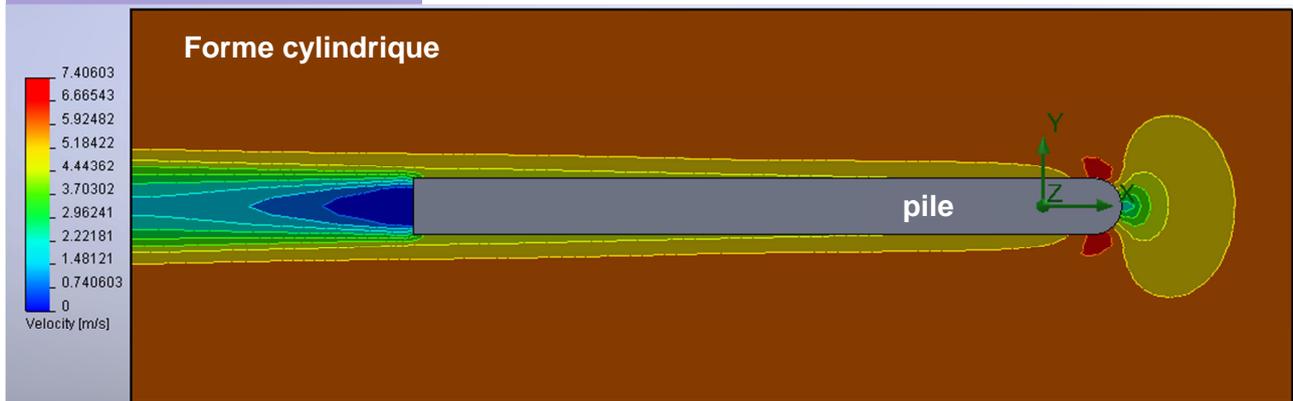
Échelle des vitesses ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)



Échelle des vitesses ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)



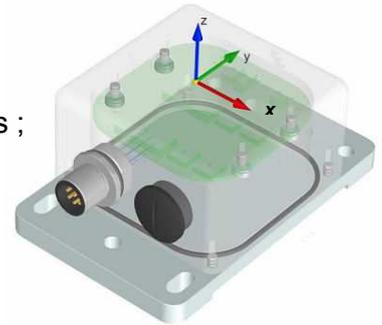
Échelle des vitesses ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)



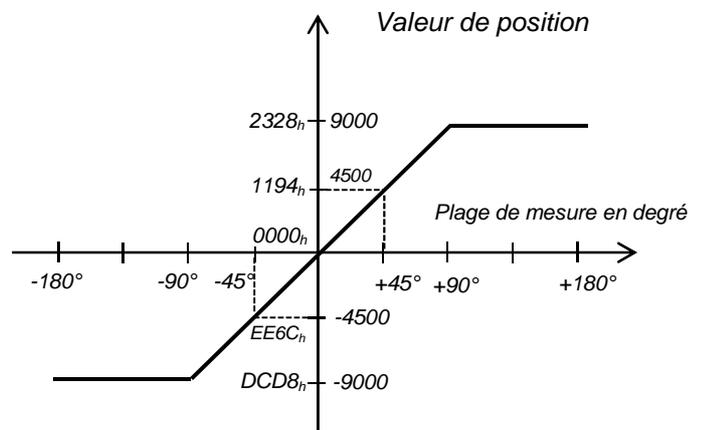
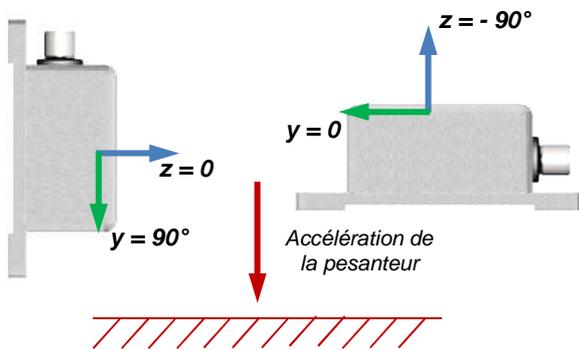
Ce composant permet la saisie de l'inclinaison dans le champ de gravitation terrestre grâce à des accéléromètres MEMS. La transmission des données peut s'effectuer par une interface CANopen ou par un signal analogique.

Caractéristiques

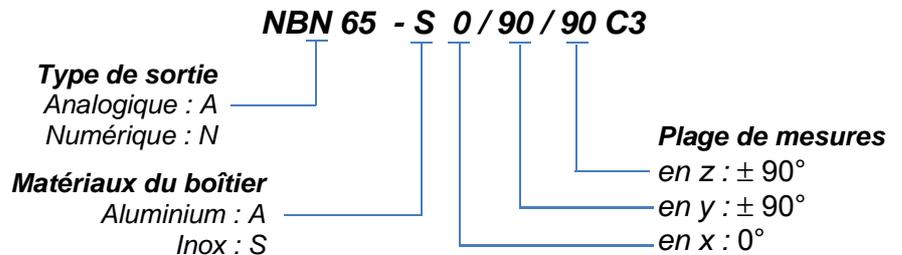
- plage de mesure : $\pm 90^\circ$;
- format des données numérique (bus CAN): binaire signé sur 16 bits ;
- pas de résolution : $0,01^\circ$;
- temps de réponse maximal : 1,1 s.



Fonctionnement, courbe caractéristique pour un pas de $0,01^\circ$

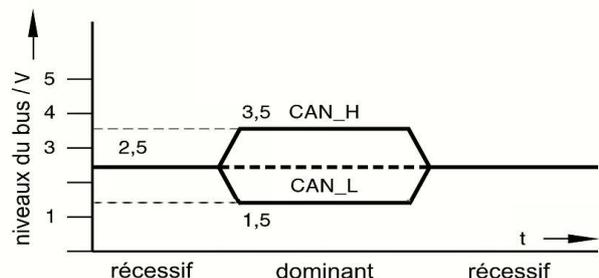
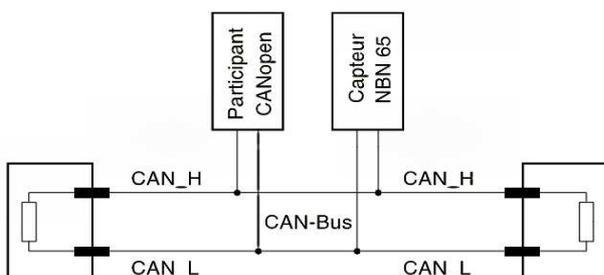


Référencement



Caractéristiques physiques du Bus CAN

Les niveaux logiques sont matérialisés par la différence de potentiel imposée entre les deux voies CAN_H (CAN HIGH) et CAN_L (CAN LOW) du bus. Ils correspondent à deux niveaux distincts appelés récessifs pour le « 1 » logique et dominants pour le « 0 » logique.



Paramétrage de la liaison CANopen

La transmission ou la réception des données sur le bus CAN est réalisée par l'échange de trames constituées d'un identifiant et de huit octets de données. Chaque objet manipulé dans ces échanges est repéré par son index et son sous-index.

Exemple de champ de données servant au paramétrage (via la commande 2F_h) du composant. Ici il s'agit d'attribuer l'adresse logique (Node Id) 0C_h au capteur recevant cette trame.

Commande	Index		Sous-index	Donnée à transmettre (ou à recevoir)			
1 ^{er} octet	2 ^e octet	3 ^e octet	4 ^e octet	5 ^e octet	6 ^e octet	7 ^e octet	8 ^e octet
2F _h	00 _h	20 _h	00 _h	0C _h	X	X	X

Remarque

L'octet de poids faible constituant un mot (format Word) est transmis en premier.

La lettre h placée en indice indique une représentation hexadécimale.

Node-ID

Chaque élément raccordé sur le bus constitue un nœud qui est identifié par une adresse logique unique appelée identificateur.

Index	Sub index	Description	Data type	Storage Acces	Type	Area/Value
2000 _h	00 _h	Node-ID	Byte Byte	rw	E ² PROM	1 ... 127

Bit rate

Le temps mis par un signal pour se propager jusqu'au nœud le plus lointain du bus doit être considéré ce qui présente une limitation de longueur en fonction du débit utilisé.

Index	Sub index	Description	Data type	Storage Acces	Type	Area/Value
2001 _h	00 _h	Bit_rate	Word	rw	E ² PROM	00 _h ... 07 _h

Value	00 _h	01 _h	2 _h	03 _h	04 _h	05 _h	06 _h	07 _h
Baud rate (kbit/s)	1000	800	500	250	125	125	50	20
Bus length (m)	25	50	100	250	500	500	1000	2500

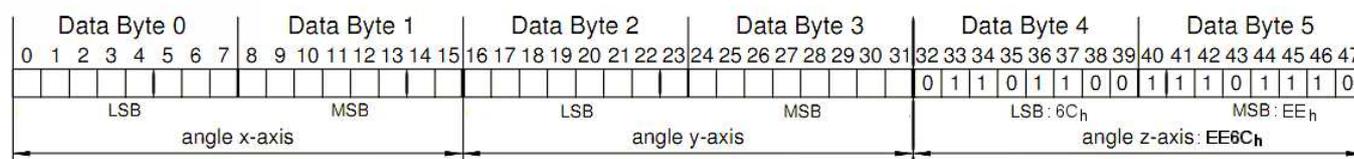
Resolution

Index	Sub index	Description	Data type	Storage Acces	Type	Area/Value
6000 _h	00 _h	resolution	Word	rw	E ² PROM	1 ... 1000

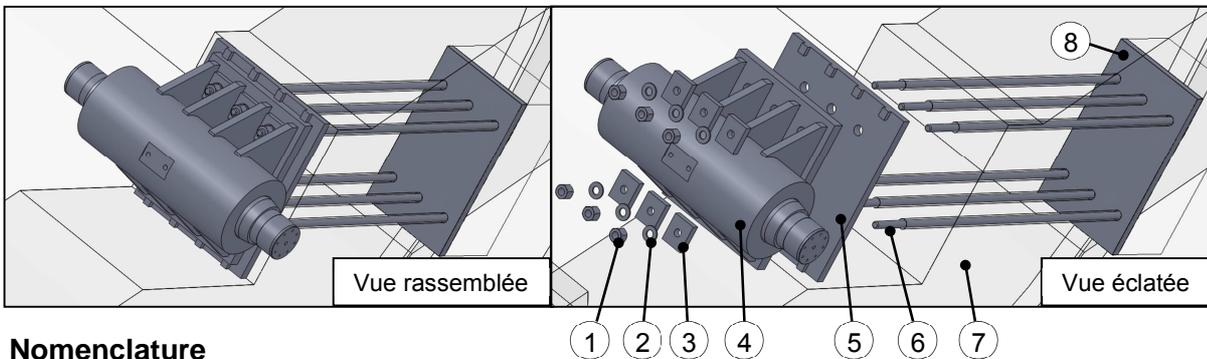
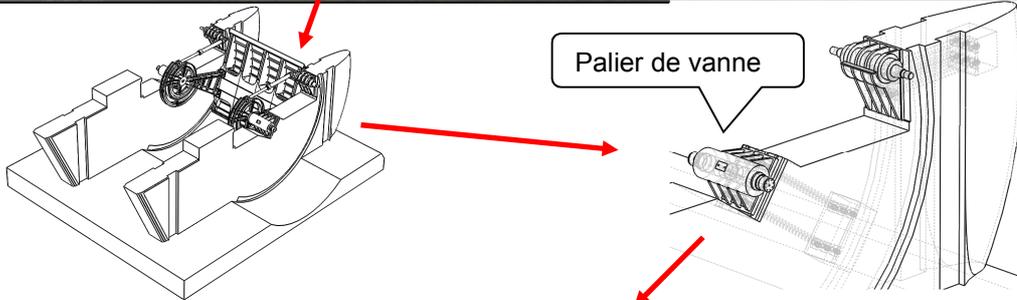
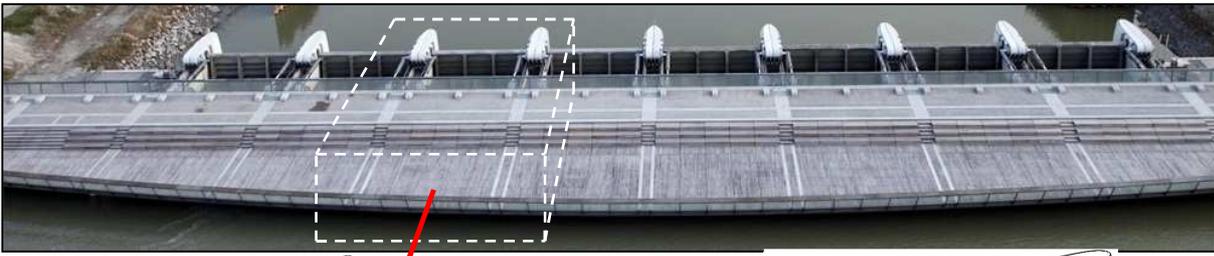
Value	01	10	100	1000
resolution	0,001	0,01	0,1	1

Format des données : Process Data Object (PDO)

Exemple de champ de données transmettant sur l'axe z le codage de la valeur -45° soit EE6C_h.



Document technique DT4 : assemblage précontraint des paliers de vannes



Nomenclature

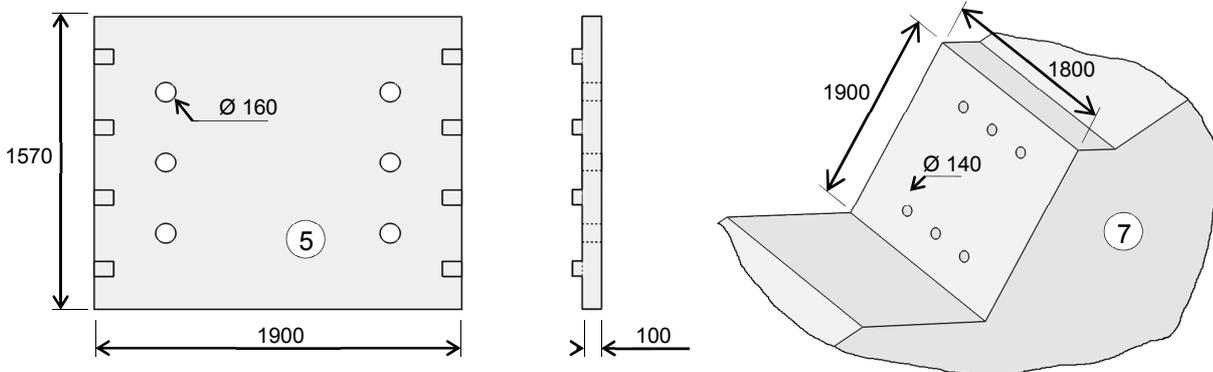
Rep.	Nb	Désignations
1	6	Écrou (Ø 75 mm)
2	6	Rondelle
3	6	Appui intermédiaire
4	1	Palier de vanne

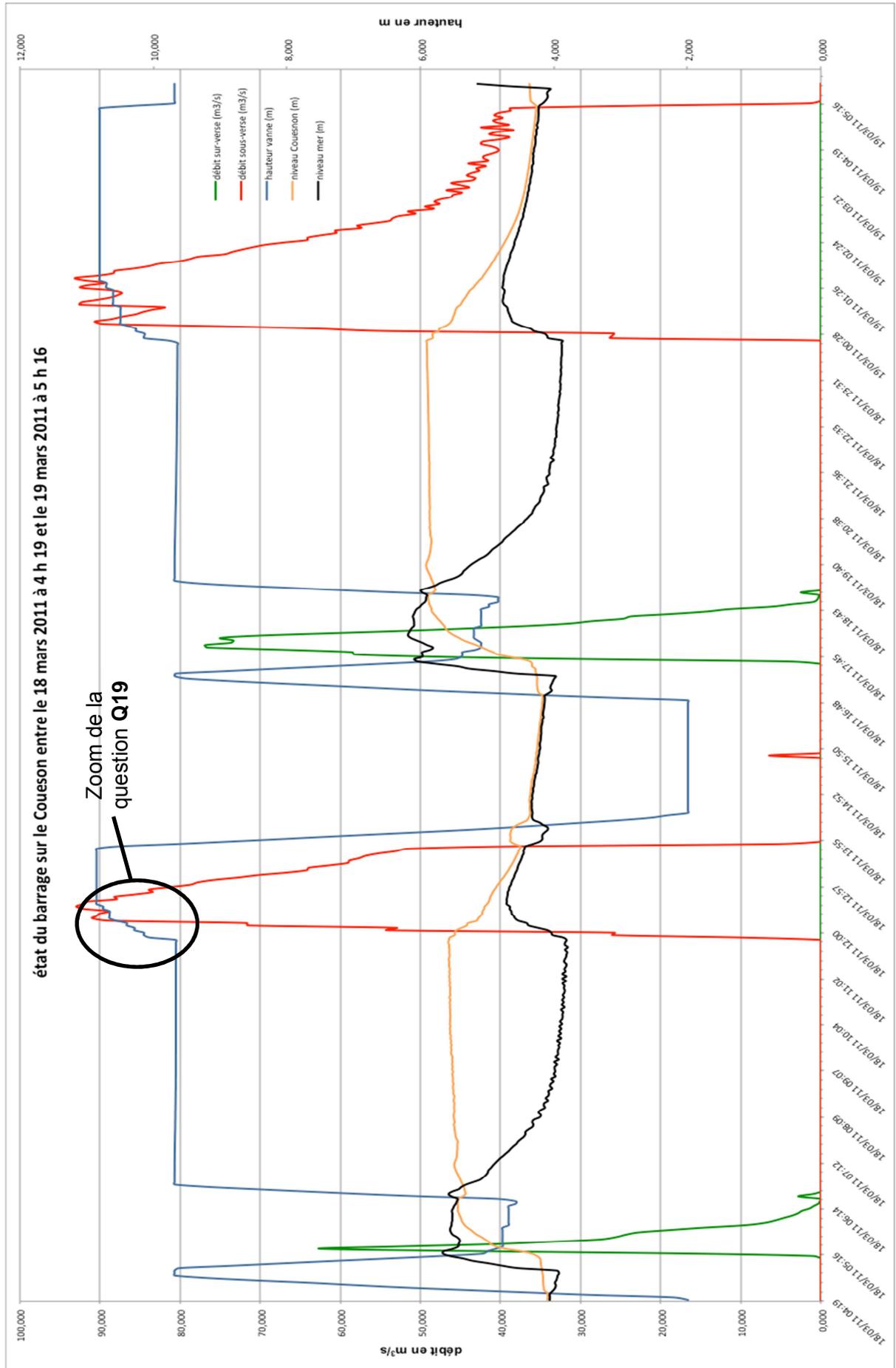
Rep.	Nb	Désignations
5	1	Plaque intermédiaire de positionnement
6	6	Tirant (Ø 75 mm)
7	1	Pile en béton
8	1	Contre-plaque

Effort normal appliqué sur chaque tirant

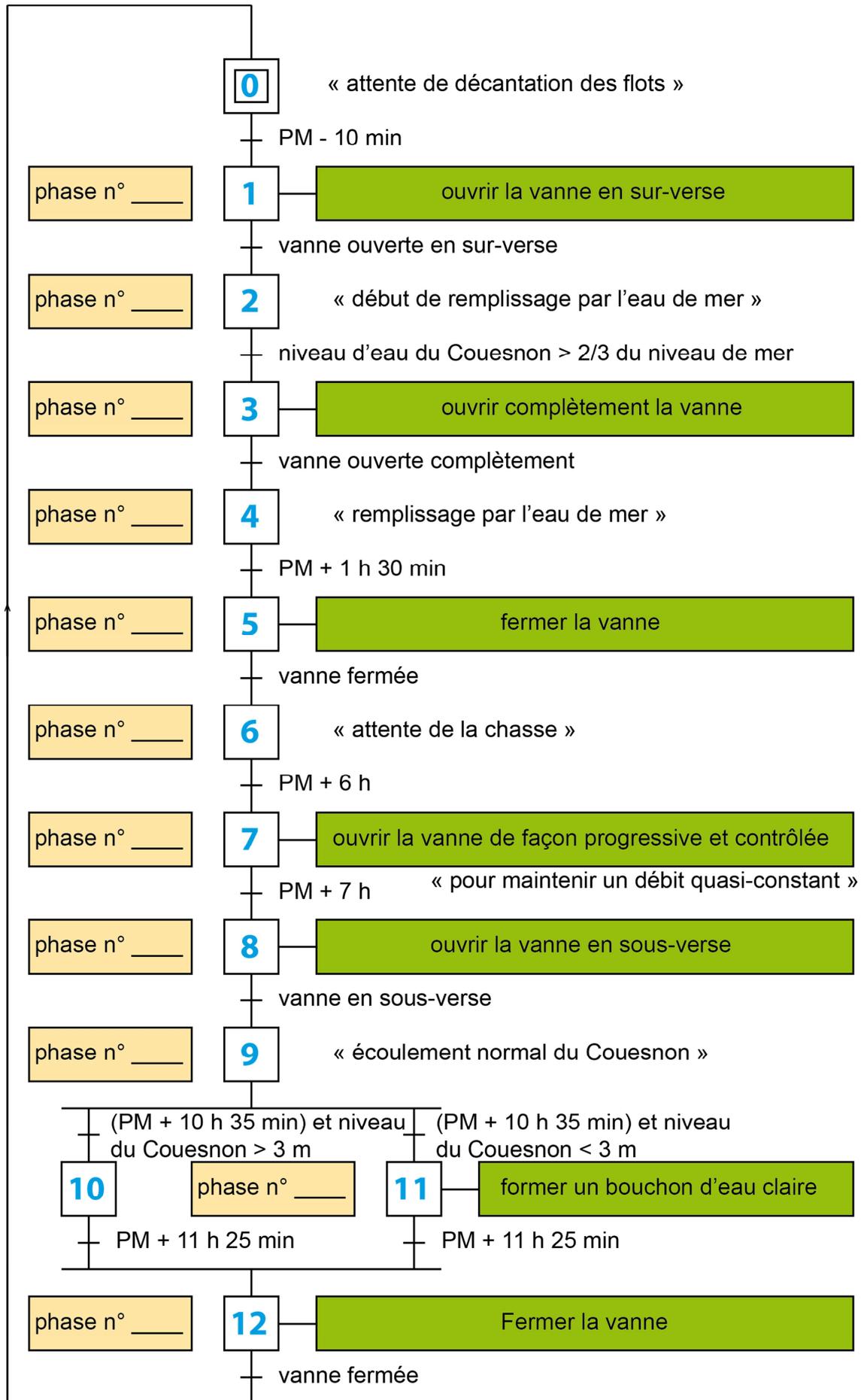


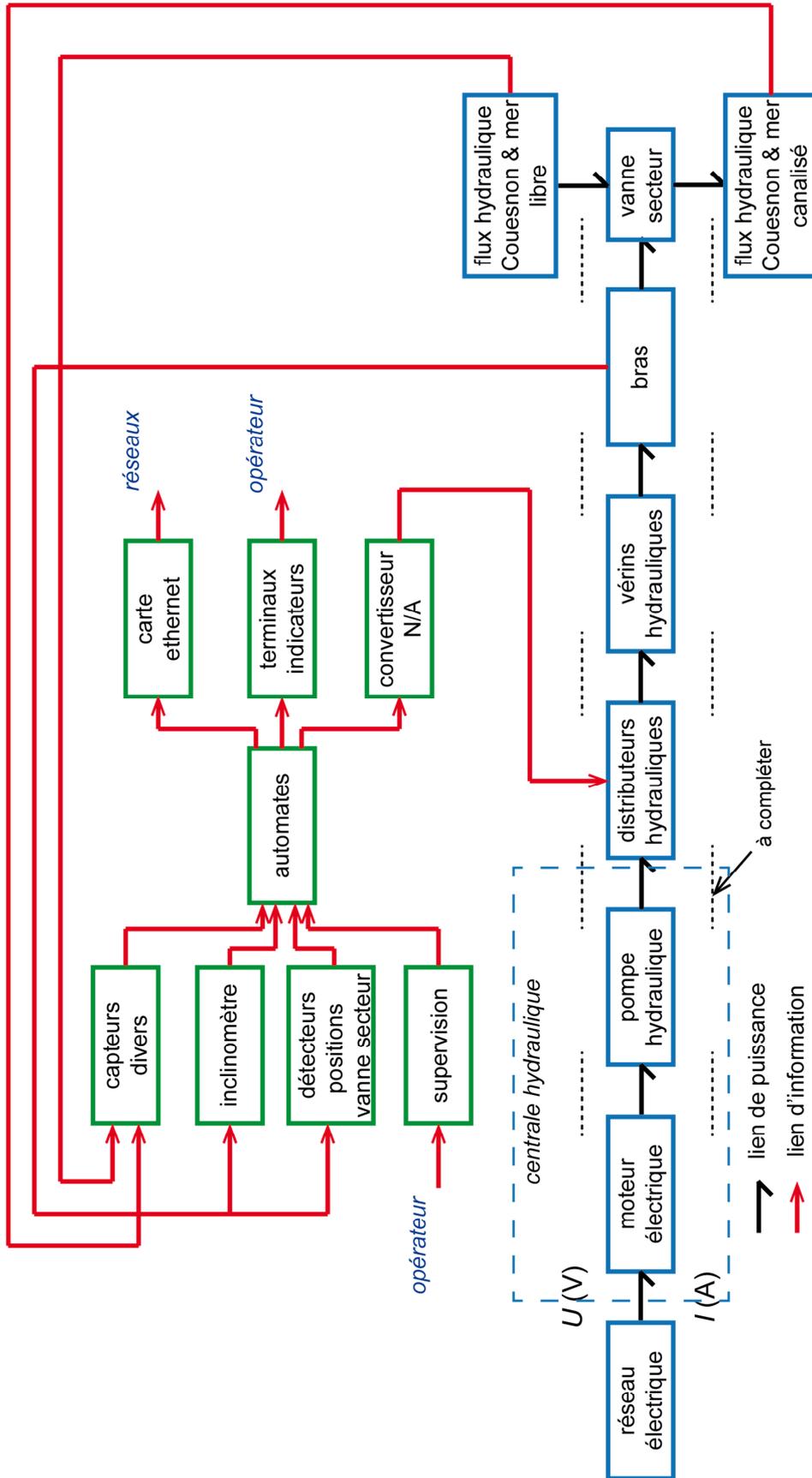
Dimensions (en mm) de la plaque intermédiaire de positionnement et de la pile en béton





Document réponse DR1





un lien de puissance véhicule deux informations dont le produit est une puissance ; exemple U et I dans le domaine électrique
 un lien d'information véhicule une seule information ; exemple U dans le domaine électrique

Document réponse DR3

Position de la vanne	Position en degré (β)	Angle mesuré	N : Nombre issu du codeur	
			Décimal	Hexadécimal
Ouverte	-90°	0	0	0000
Ouverte en sur-verse	-53°			
Fermée	-20°			
Ouverte en sous-verse	-10°	-80	-8000	

Programmation du débit

Commande	Index		Sous-index	Donnée à transmettre			
1 ^{er} octet	2 ^e octet	3 ^e octet	4 ^e octet	5 ^e octet	6 ^e octet	7 ^e octet	8 ^e octet

Programmation de la résolution

Commande	Index		Sous-index	Donnée à transmettre			
1 ^{er} octet	2 ^e octet	3 ^e octet	4 ^e octet	5 ^e octet	6 ^e octet	7 ^e octet	8 ^e octet

Algorithme Contrôle d'une vanne

Lire Consigne ;

Lire Codeur ; *saisie de la grandeur issue du codeur de position angulaire*

Suivant Consigne Faire

```

Complètement_Fermée :
  TantQue Codeur > -7000
  | Fermer_Vanne ;
  | Lire ..... ;
  FinTantQue ;

  TantQue Codeur < .....
  | Ouvrir_Vanne ;
  | Lire ..... ;
  FinTantQue ;

..... :
  TantQue Codeur < 0
  | Ouvrir_Vanne ;
  | Lire Codeur ;
  FinTantQue ;

Position_Sous_Verse :
  TantQue Codeur > -8000
  | ..... ;
  | Lire Codeur ;
  FinTantQue ;

Angle_De_Position_Asservi :
  Répéter
  | Asservir ;
  | Lire ..... ;
  Jusqu'à Consigne = Fin_Asservissement ;

```

FinSuivant ;

Fin algorithme