

# BACCALAURÉAT SCIENTIFIQUE

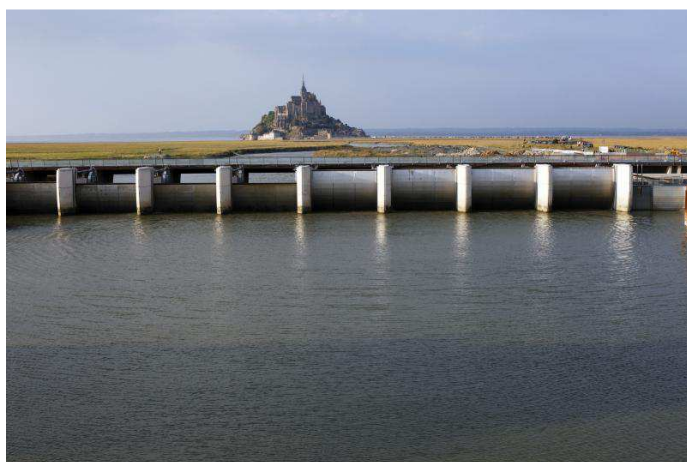
## Épreuve de sciences de l'ingénieur

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 2

- **texte** ..... pages 2 à 15
  1. *Réponses au besoin*
  2. *Génération et régulation du flux hydraulique*
  3. *Modélisation du comportement dynamique du barrage*
  4. *Analyse d'écart entre le souhaité, le simulé et le réalisé*
  5. *Conclusion sur la problématique du sujet*
- **documents techniques**..... pages 17 à 19
- **documents réponses**..... pages 20 à 23

**Le sujet comporte 21 questions.**

**Les documents réponses DR1 à DR4 (pages 20 à 23) 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. »<sup>1</sup>

<sup>1</sup> [http://www.projetmontsaintmichel.fr/pourquoi\\_agir/objectifs.html](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 culées<sup>2</sup> ;
- 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. Enfin, 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.

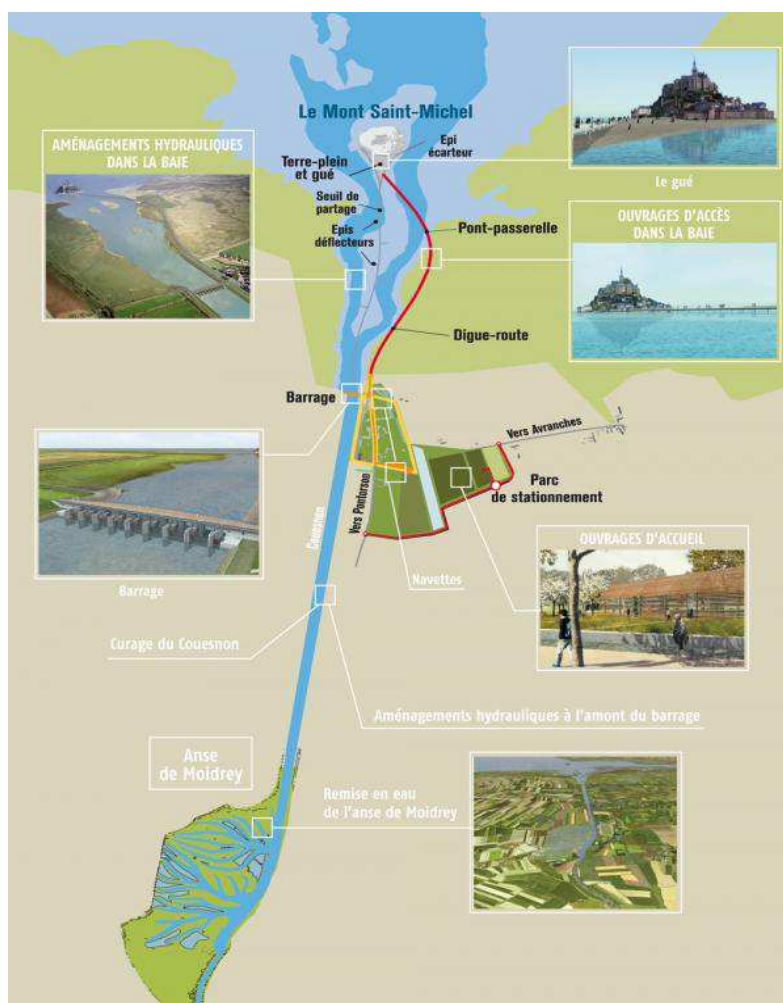


Figure 3 : vue d'ensemble de la zone du Couesnon

<sup>2</sup> 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 marnage<sup>3</sup> 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'estran<sup>4</sup> 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 coefficients<sup>5</sup> des marées dépassent 90. Pour revenir à la situation qui prévalait au début du XIX<sup>e</sup> 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 IGN69<sup>6</sup> sur un secteur circulaire arbitrairement choisi à 1 km de rayon.

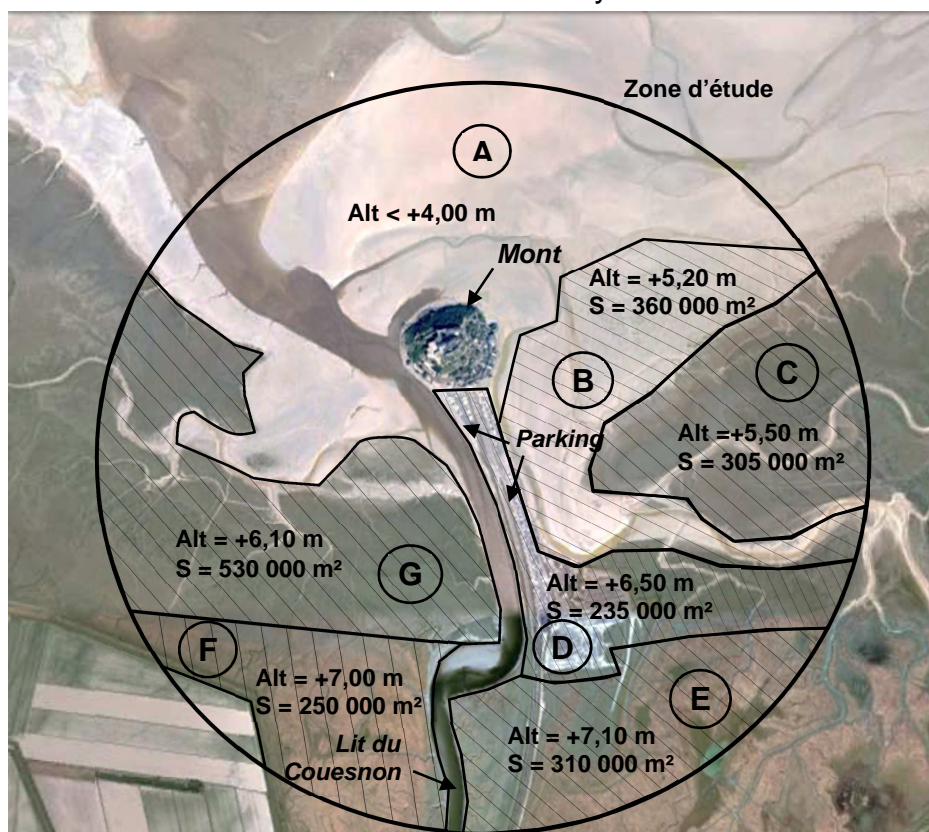


Figure 4 : découpage de zones autour du Mont-Saint-Michel à hauteurs différentes

**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.

<sup>3</sup> Dénivellation constatée entre une pleine mer (marée haute) et une basse mer (marée basse) successive.

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

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

<sup>6</sup> 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 CO<sub>2</sub>. 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 dragage<sup>7</sup> 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 m<sup>3</sup>** 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 chasse<sup>8</sup> 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 million<sup>9</sup> de m<sup>3</sup>** 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 CO<sub>2</sub> 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> 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.

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

<sup>8</sup> Rejet au large.

<sup>9</sup> Ce volume inclut la suppression de la digue-route.

## 2. Génération et régulation du flux hydraulique

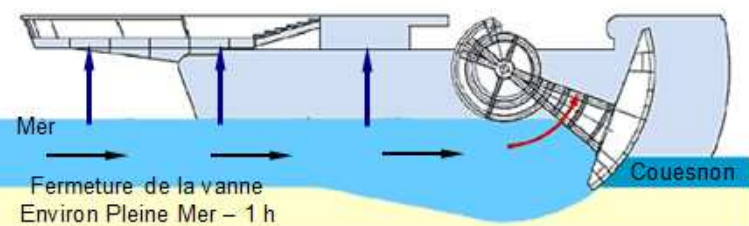
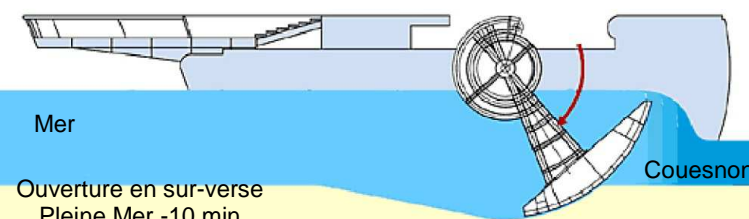
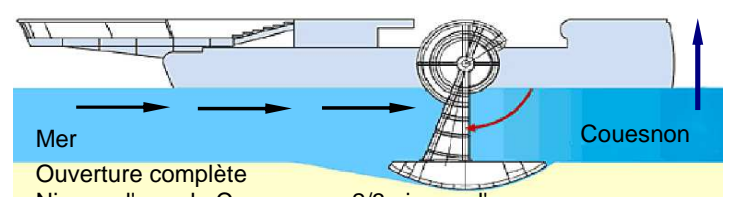
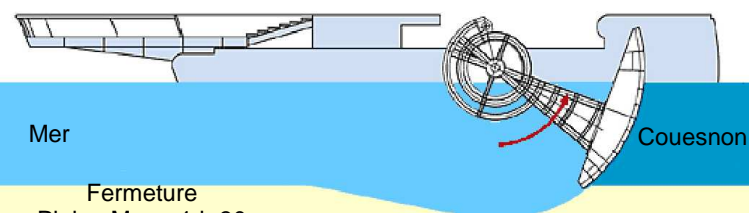
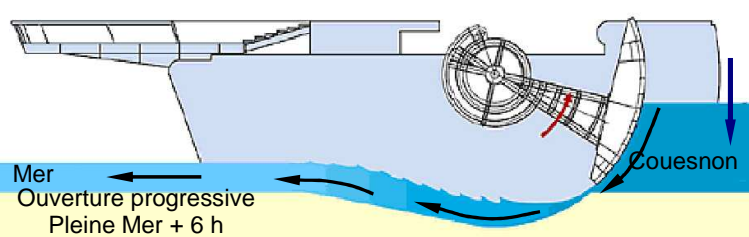
*Objectif de cette partie : analyser la solution retenue pour créer et réguler un flux d'eau capable de repousser les sédiments au-delà du Mont-Saint-Michel.*

### 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><b>Phase n°1</b></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><b>Phase n°2</b></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><b>Phase n°3</b></p>  <p>Mer Ouverture complète Niveau d'eau du Couesnon &gt; 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><b>Phase n°4</b></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><b>Phase n°5</b></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>

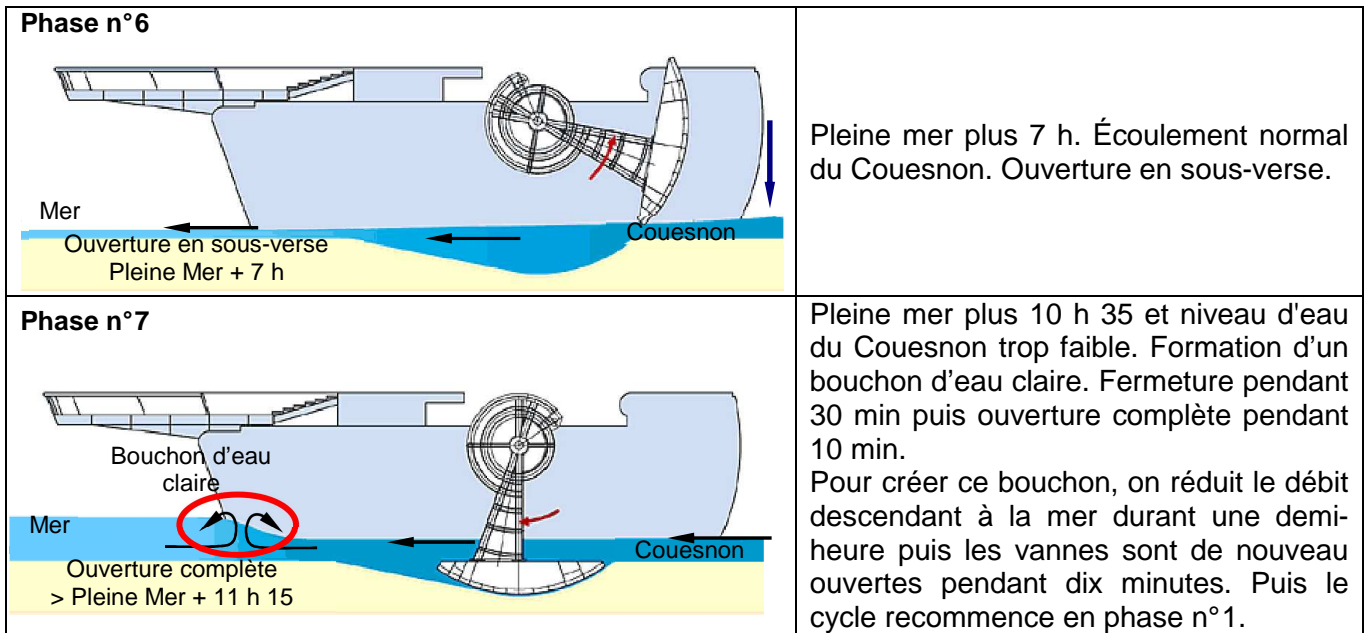


Figure 6 : phasage du fonctionnement du barrage

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

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  $y_0 = 0$ .

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

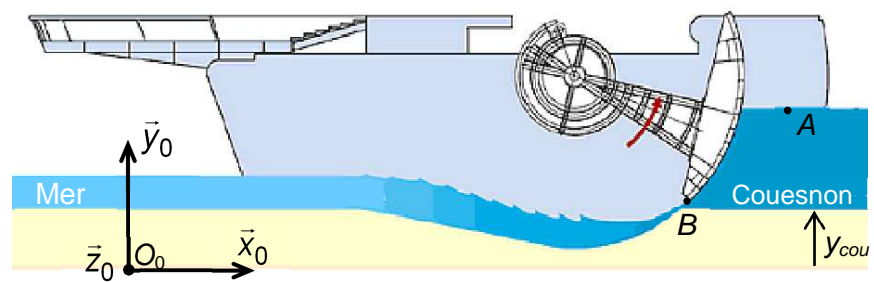


Figure 7 : coupe d'une vanne-secteur en position de sous-verse

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

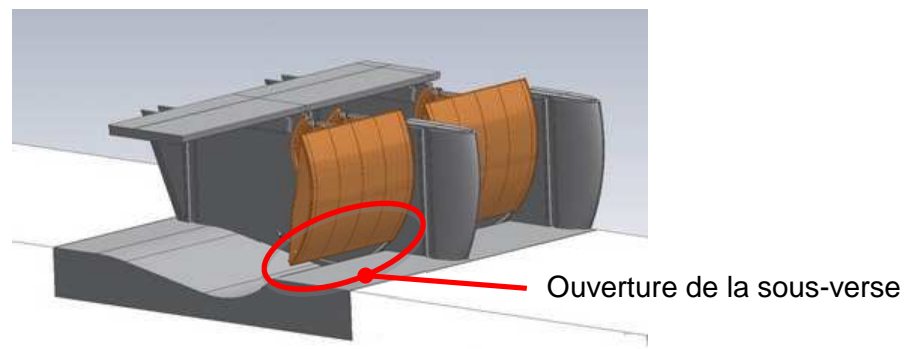


Figure 8 : maquette volumique en phase de sous-verse

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 la figure 7. 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  $L = 9$  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  $y_B = 2,236$  m pour l'altitude de 4 m et  $y_B = 2,15$  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 ?

### 3. Modélisation du comportement dynamique du barrage

*Objectif de cette partie :*

- **modéliser** et **simuler** les chaînes d'énergie et d'information liées à la tâche « manœuvrer une vanne » pour **valider** les choix des concepteurs et **prévoir** son comportement dans les différentes situations du cahier des charges ;
- **vérifier** la capacité opérationnelle du barrage en cas de coupure du réseau.

*Détection et codage de la position des vannes*

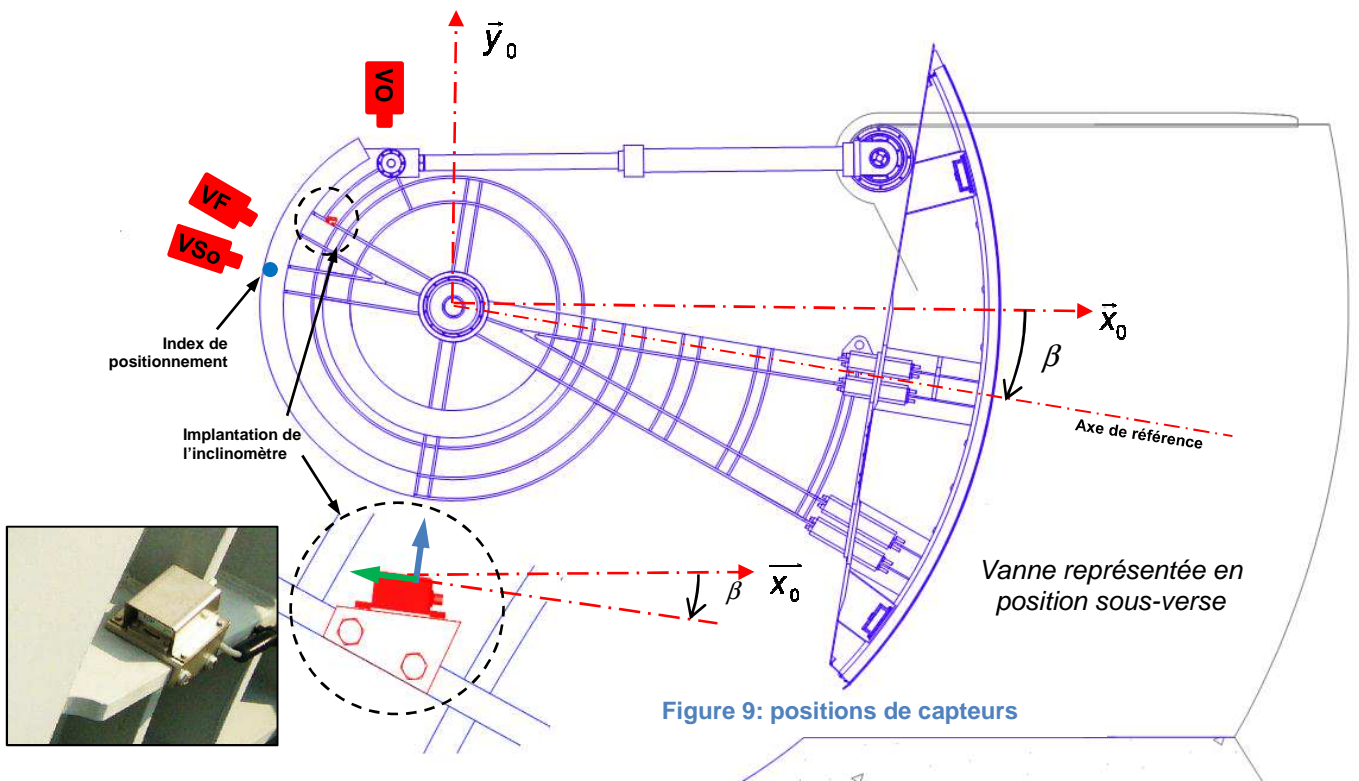
Le caractère asservi du système de manœuvre de vannes contribue à satisfaire les contraintes hydrauliques définies par le programme de chasse. Ce type de commande rend nécessaire l'usage de codeurs de position angulaire de la vanne par rapport à la pile pour lesquels le choix technologique s'est porté sur des inclinomètres de la série NBN 65.

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.

<i>Position de la vanne</i>	<i>Capteur TOR associé</i>	<i>Angle (<math>\beta</math>)</i>
Complètement ouverte	VO	-90°
Complètement fermée	VF	-20°
Ouverte en sous-verse	VSo	-10°

Placé dans une zone non immergeable sur un support adapté, l'inclinomètre permet la mesure de l'angle  $\beta$  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.





**Q5.** Après avoir pris connaissance des éléments descriptifs du codeur utilisé sur le DT3, **compléter** le tableau de valeurs proposé du document réponse DR3.

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**

<b>CO</b>	La vanne doit s'ouvrir à son maximum (voir principe de chasse phase n°3).
<b>CF</b>	La vanne doit se fermer (voir principe de chasse phase n°4).
<b>PSV</b>	La vanne s'ouvre en sous-verse (voir principe de chasse phase n°6).
<b>Ass</b>	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).
<b>FinAss</b>	Cette consigne permet de sortir du mode asservi.

**Actions sur la vanne**

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

**Q6. Compléter**, en vous appuyant sur la description ci-dessus des consignes et des actions, l'algorithme du document réponse DR3 décrivant le fonctionnement partiel du système de manœuvre d'une vanne.

Pour compléter le modèle multiphysique (document technique DT1), nous allons calculer les actions mécaniques de l'eau sur une vanne-secteur. L'étude est effectuée dans le cas le plus défavorable, c'est-à-dire en

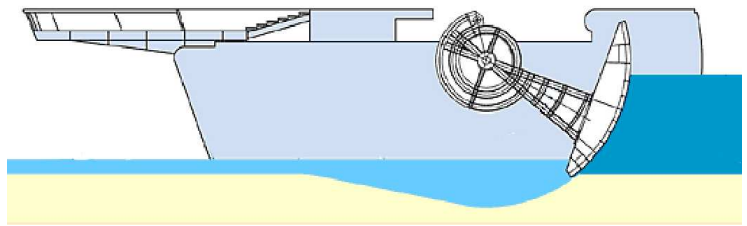


Figure 10 : vanne en position fermée

fin de phase 4 (pleine mer + 6 heures). Dans cette situation, on considère que la hauteur d'eau en aval du barrage est négligée devant celle en amont. L'action mécanique de l'eau sur la vanne 1 est répartie sur toute la surface de contact entre l'eau et la vanne.

L'effort élémentaire dû à l'action mécanique de l'eau sur une surface élémentaire de la vanne 1, est défini au point  $K$  de coordonnée  $y_K$  sur l'axe  $(O, \vec{y}_0)$  par :

$$\vec{F}_{\text{élémentaire}}(\text{eau} \rightarrow 1) = -\rho_K \cdot S_{\text{élémentaire}} \cdot \vec{n}_K$$

avec

- $\rho_K = \rho_{\text{eau}} \cdot g \cdot (h - d - y_K)$  : pression hydrostatique au point  $K$  ;
- $S_{\text{élémentaire}}$  : surface élémentaire associée au point  $K$  ;
- $\vec{n}_K$  : normale, au point  $K$ , à la surface cylindrique (d'axe  $(O, \vec{z}_0)$ , de longueur  $L$  et de rayon  $R$ ) de la vanne 1 en contact avec l'eau.

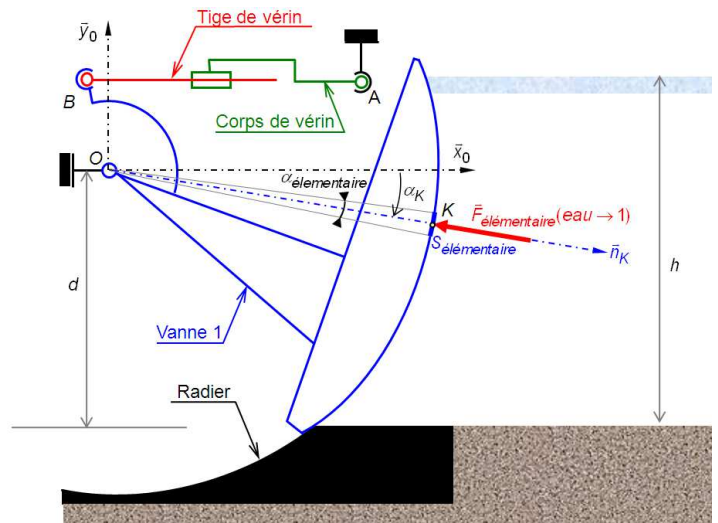
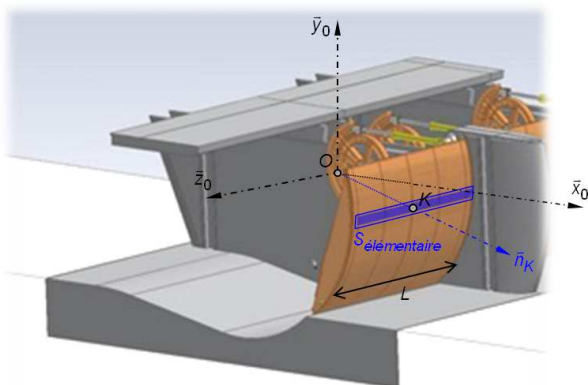


Figure 11 : paramétrage d'une vanne-secteur

**Rappel :** la longueur d'un arc de cercle de rayon  $r$  et de secteur angulaire  $\theta$  est  $r \times \theta$ .

L'angle  $\alpha_K = (\vec{x}_0, \vec{n}_K)$  est défini positif lorsqu'il est orienté dans le sens trigonométrique et négatif lorsqu'il est orienté dans le sens horaire.

Données :  $d = 5,5\text{m}$ ,  $h = 5\text{m}$ ,  $L = 9\text{m}$ ,  $R = 7\text{m}$ ,  $g = 9,81\text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  et  $\rho_{\text{eau}} = 1030\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

**Q7. Donner** l'expression de  $\vec{F}_{\text{élémentaire}}(\text{eau} \rightarrow 1)$  en fonction de  $\alpha_K$ ,  $\alpha_{\text{élémentaire}}$ ,  $\rho_{\text{eau}}$ ,  $g$ ,  $h$ ,  $d$ ,  $L$  et  $R$ .

**Q8. Déterminer**, au point  $O$ , le moment  $\vec{M}_{\text{élémentaire}}(O, \text{eau} \rightarrow 1)$  de l'effort élémentaire de l'eau sur la vanne. **En déduire**, au point  $O$ , le moment résultant  $\vec{M}(O, \text{eau} \rightarrow 1)$  de l'action mécanique de l'eau sur la vanne.

La résultante de l'action mécanique de l'eau sur la vanne est :

$$\vec{R}(eau \rightarrow 1) = \begin{bmatrix} -\rho_{eau} \cdot g \cdot R \cdot L \cdot \left[ (h-d) \times 0,7 + \frac{R}{2} \times 0,6 \right] \\ -\rho_{eau} \cdot g \cdot R \cdot L \cdot \left[ (d-h) \times 0,4 - \frac{R}{2} \times 0,4 \right] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{en } N) \text{ si } \begin{cases} R, L \text{ et } h \text{ en m} \\ g \text{ en } m \cdot s^{-2} \\ \rho_{eau} \text{ en } kg \cdot m^{-3} \end{cases}$$

$(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$

**Q9. Indiquer** la façon dont a été obtenu ce résultat à partir du résultat de la question **Q7** puis **donner** l'expression du torseur, au point O, de l'action mécanique de l'eau sur la vanne. **Réaliser** l'application numérique.

**Q10. Indiquer** si cette action mécanique a une composante de la vanne par rapport à la pile du barrage

**Q11. Conclure** sur la nécessité d'intégrer l'action mécanique de l'eau sur la vanne comme une donnée d'entrée du modèle multiphysique permettant de simuler le comportement dynamique du système d'orientation la vanne.

Á

Vérification de la capacité de l'alimentation de secours en cas de rupture du réseau

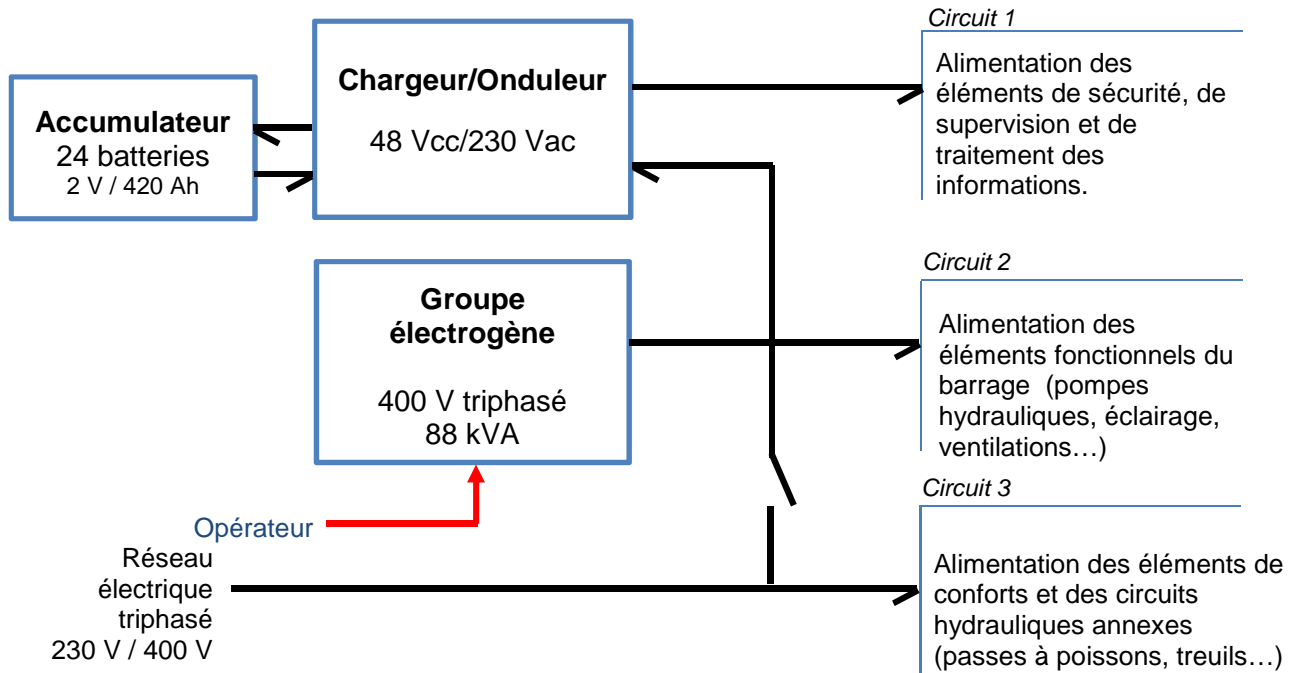


Figure 12 : synoptique du dispositif de secours et de ses circuits de délestage

Le barrage assure également la prévention des d'inondations de l'Anse du Moidrey et de ses environs (figure 3). La continuité du fonctionnement de l'ouvrage est impérative pour être en mesure de juguler les effets d'une montée des eaux du Couesnon en période de crues ou lors des grandes marées.

En cas de coupure du réseau électrique, un onduleur permet la sauvegarde et la supervision des données sur une durée de 15 minutes. Au-delà de cette période, un

groupe électrogène de secours assure l’approvisionnement en énergie garantissant la capacité opérationnelle du barrage.

*Hypothèses concernant le chargeur/Onduleur*

*Le rendement de l’onduleur est proche de 100 %. Le groupe électrogène alimente le circuit 1 via l’onduleur sans devoir assurer la charge des batteries.*

**Q12.** Après avoir complété les éléments du tableau sur le document réponse DR4, **calculer** la puissance apparente délivrée aux circuits 1 et 2 par le groupe électrogène.

**Q13. Conclure sur l’efficacité du dispositif** en proposant des éléments chiffrés sur le dimensionnement des batteries utilisées.

*Pour rappel*

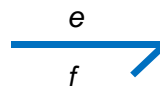
	Monophasé	Triphasé	Unité	Relations fondamentales
Puissance active	$P = UI \cos \varphi$	$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi$	W	$Q = P \tan \varphi$ $S^2 = P^2 + Q^2$ Seules les puissances actives et réactives s’ajoutent entre elles.
Puissance réactive	$Q = UI \sin \varphi$	$Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi$	VAr	
Puissance apparente	$S = UI$	$S = \sqrt{3}UI$	VA	

#### 4. Analyse d’écarts 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 :



**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  $I$ .

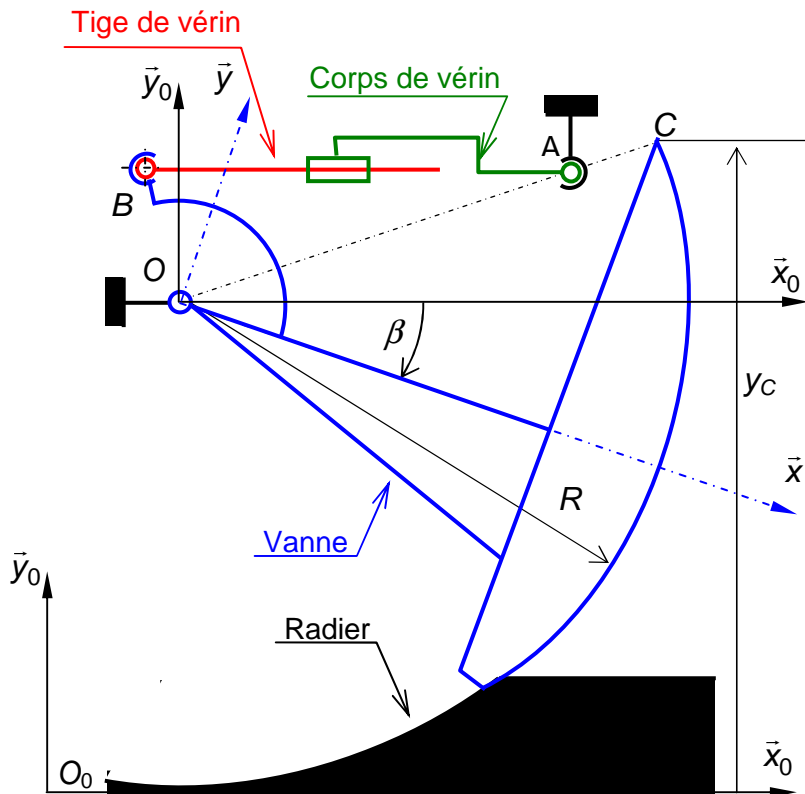


Figure 13 : hauteur d'une vanne

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 13).

La mesure réelle de la position de la vanne est réalisée par un inclinomètre mesurant l'angle  $\beta$  (figure 13).

**Q15. Préciser, sans la déterminer, la relation qu'il a été nécessaire d'intégrer au modèle multiphysique du document DT1 pour permettre sa simulation.**

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

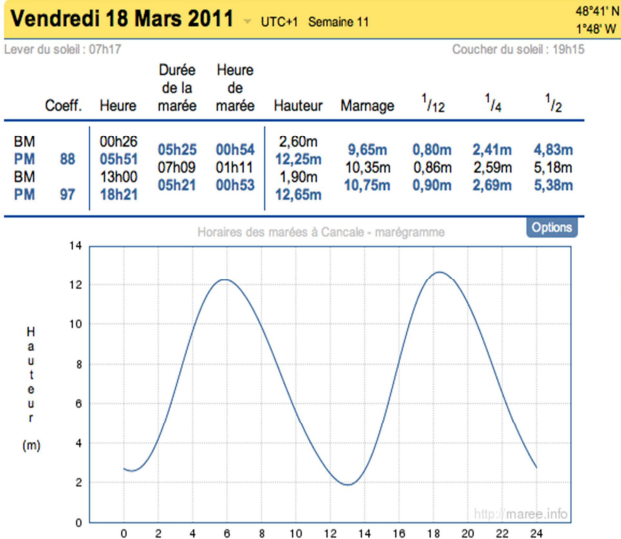


Figure 14 : horaire des marée le 18 mars 2011 au Mont-Saint-Michel

### Rappel :

- 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 <sup>3</sup>

**Q17. Evaluer**, à l'aide du document DT2, 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 15 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 DT2) en mouvement de sous-verse.

**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.

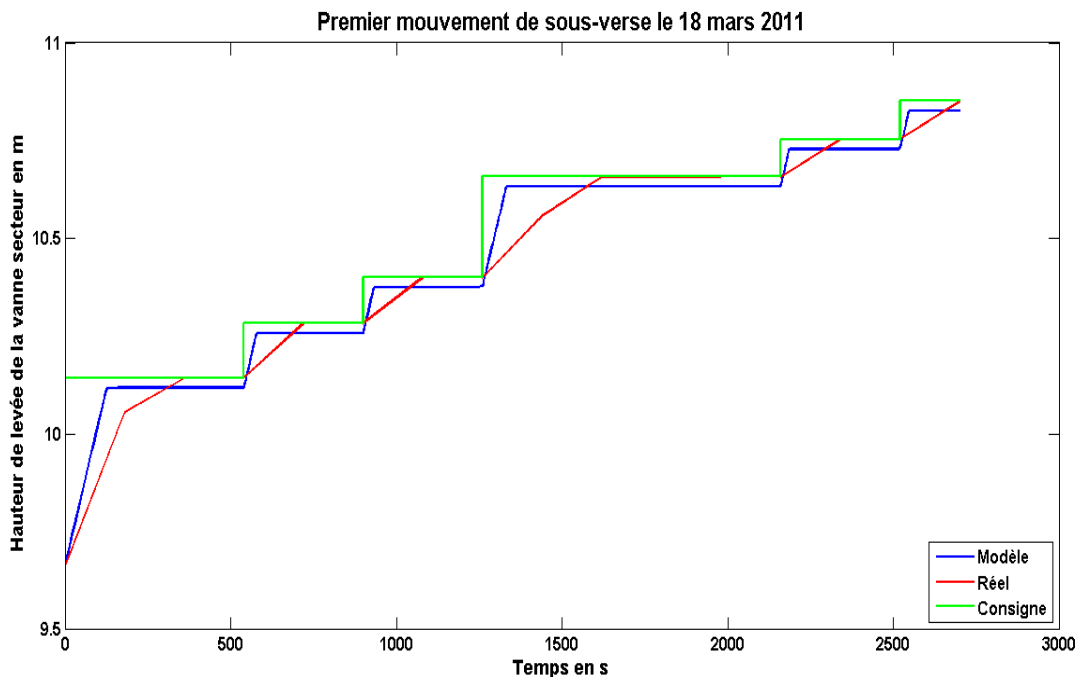


Figure 15 : mouvement de sous-verse d'une vanne le 18 mars entre 11 h 54 et 12 h 36

## 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 16 ci-après montre deux vues prises par télédétection laser<sup>10</sup> aéroportée permettant de réaliser une altimétrie précise.

Une étude permet d'estimer qu'une superficie de près de 1,5 km<sup>2</sup> 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**.

<sup>10</sup> Appelée également LIDAR, il s'agit d'une technique de mesure optique basée sur l'analyse des propriétés d'une lumière laser renvoyée.

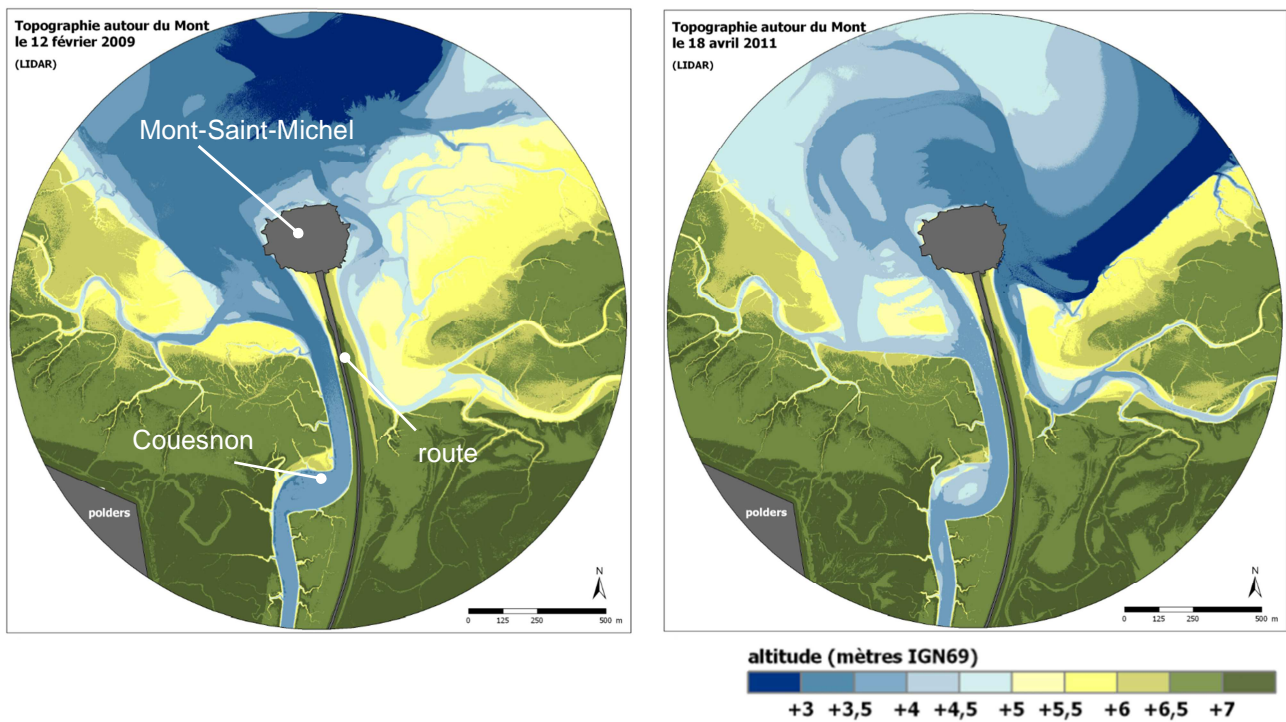


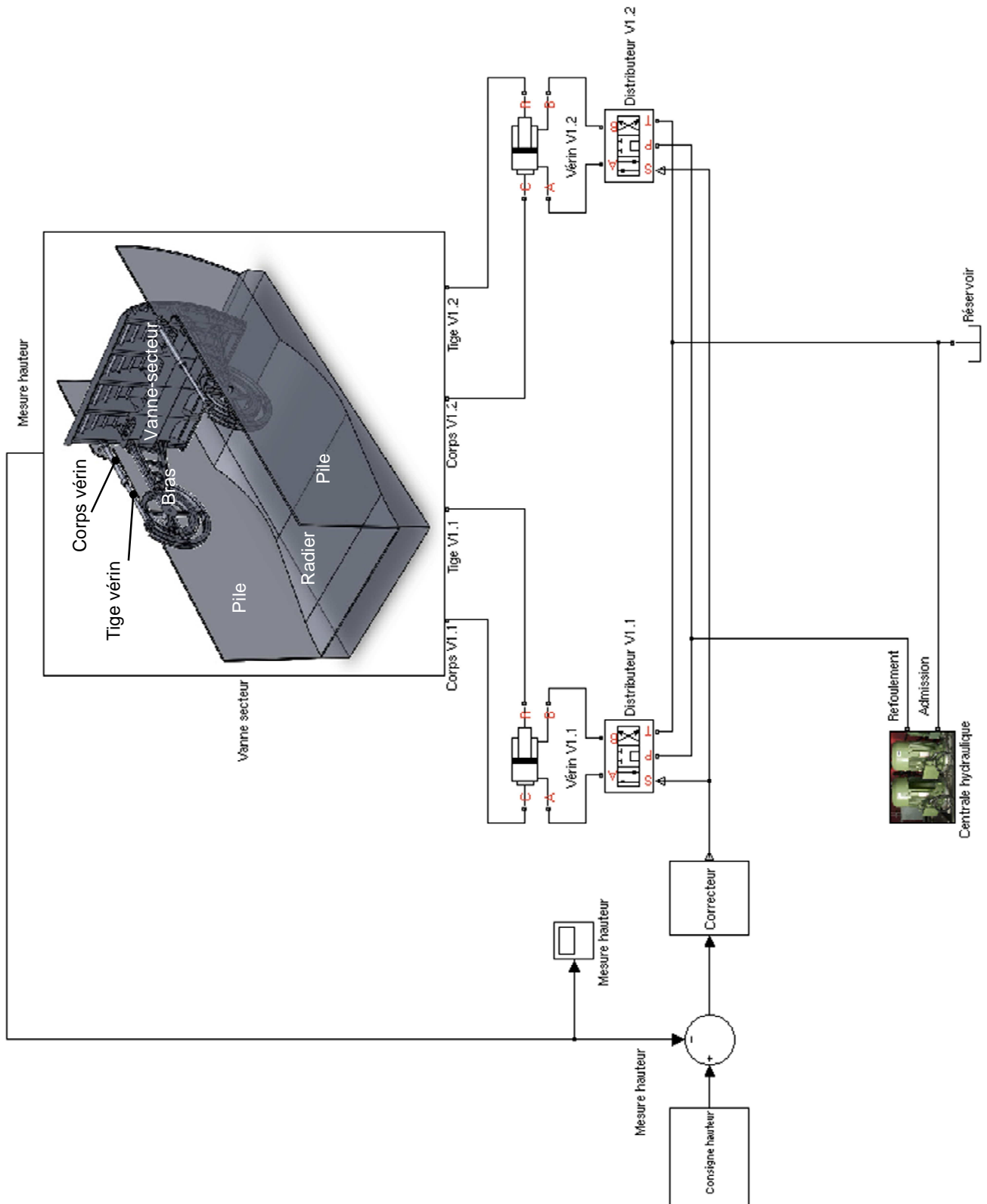
Figure 16 : photographies Lidar de la zone du Mont-Saint-Michel à environ trois années d'intervalle

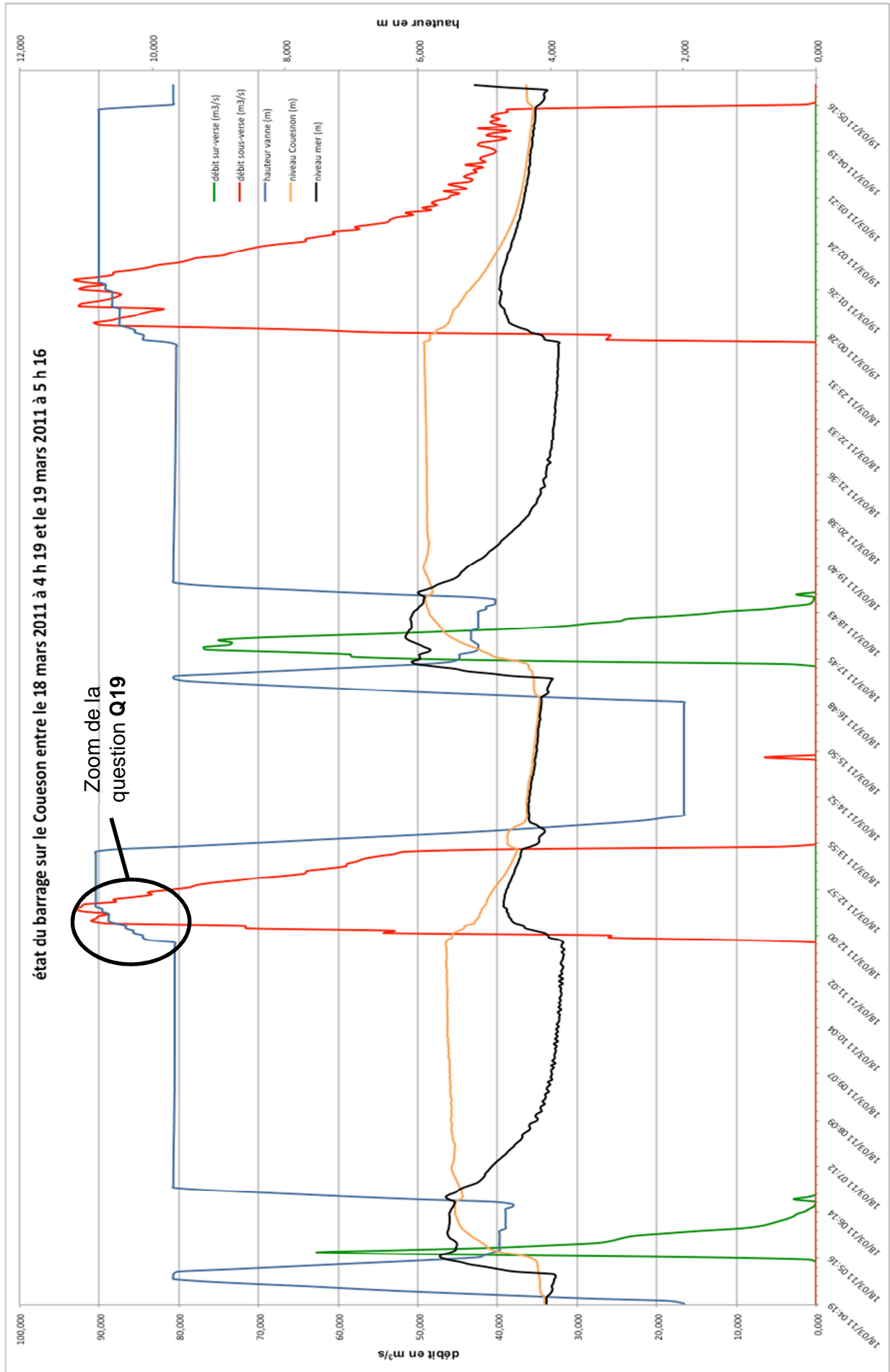
**Q21. Proposer**, sous forme discursive (5 lignes au maximum), des arguments, à partir des résultats obtenus, pour **valider** le choix des concepteurs du projet par rapport à la problématique du sujet indiquée à la page 3.



## 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).



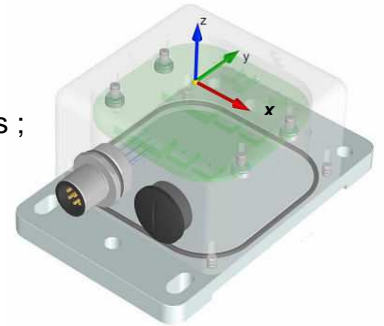


## Document technique DT3 : caractéristiques de l'inclinomètre **NBN 65-S0/90/90 C3**

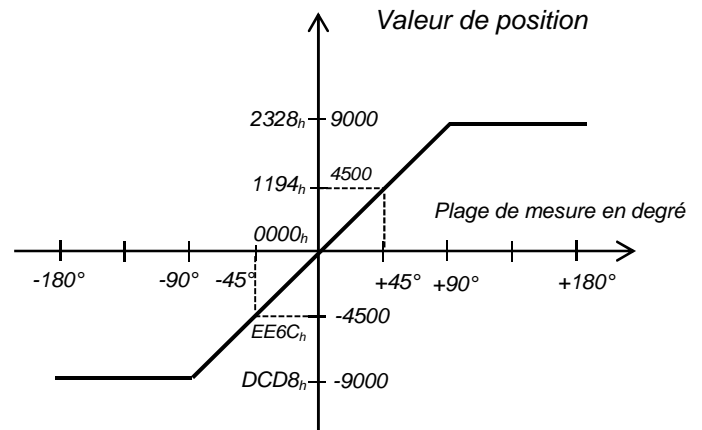
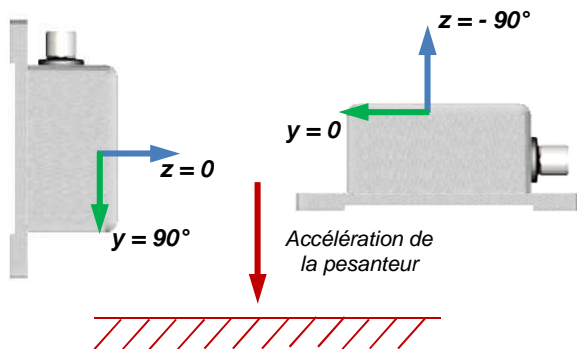
Ce composant permet la saisie de l'inclinaison dans le champ de gravitation terrestre grâce à des accéléromètres MEMS. La transmission des données peut s'effectuer par une interface CANopen ou par un signal analogique.

### Caractéristiques

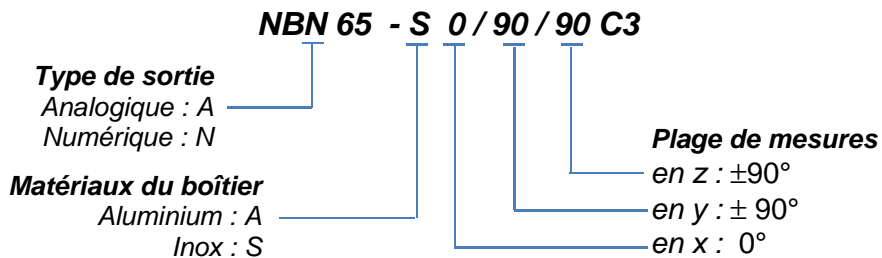
- plage de mesure :  $\pm 90^\circ$ ;
- format des données numérique (bus CAN): binaire signé sur 16 bits ;
- pas de résolution :  $0,01^\circ$ ;
- temps de réponse maximal : 1,1 s.

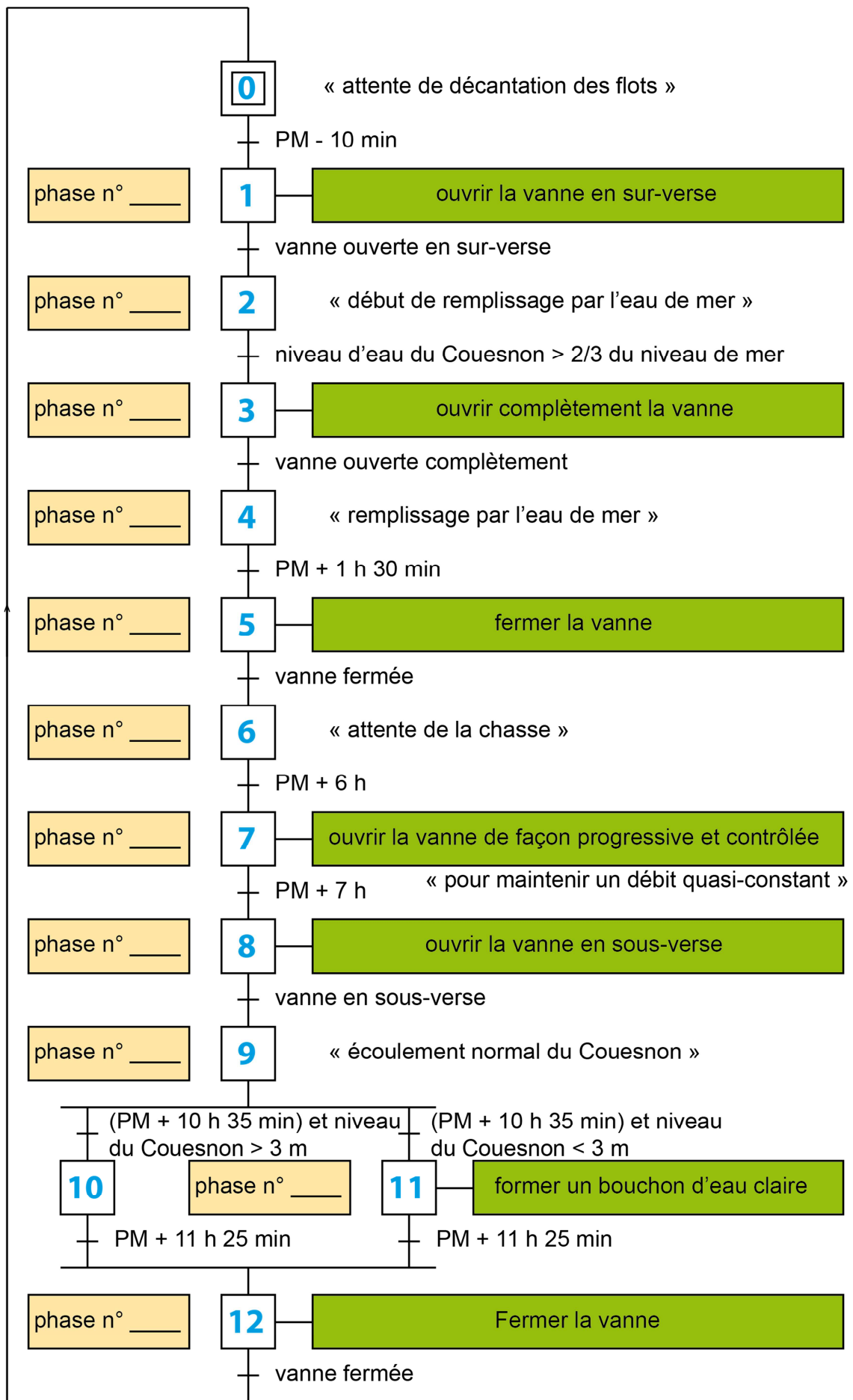


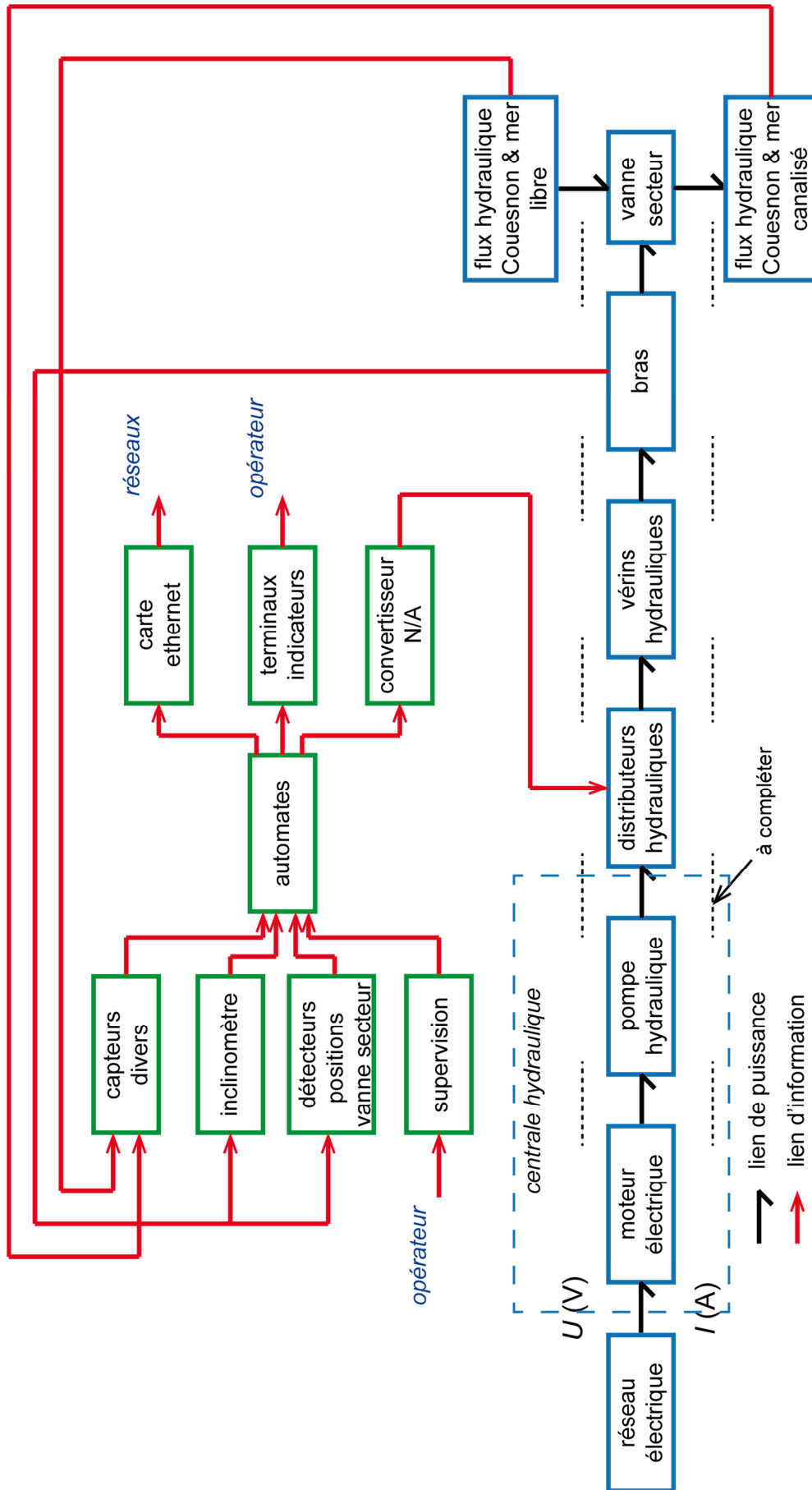
### Fonctionnement, courbe caractéristique pour un pas de $0,01^\circ$



### Référencement



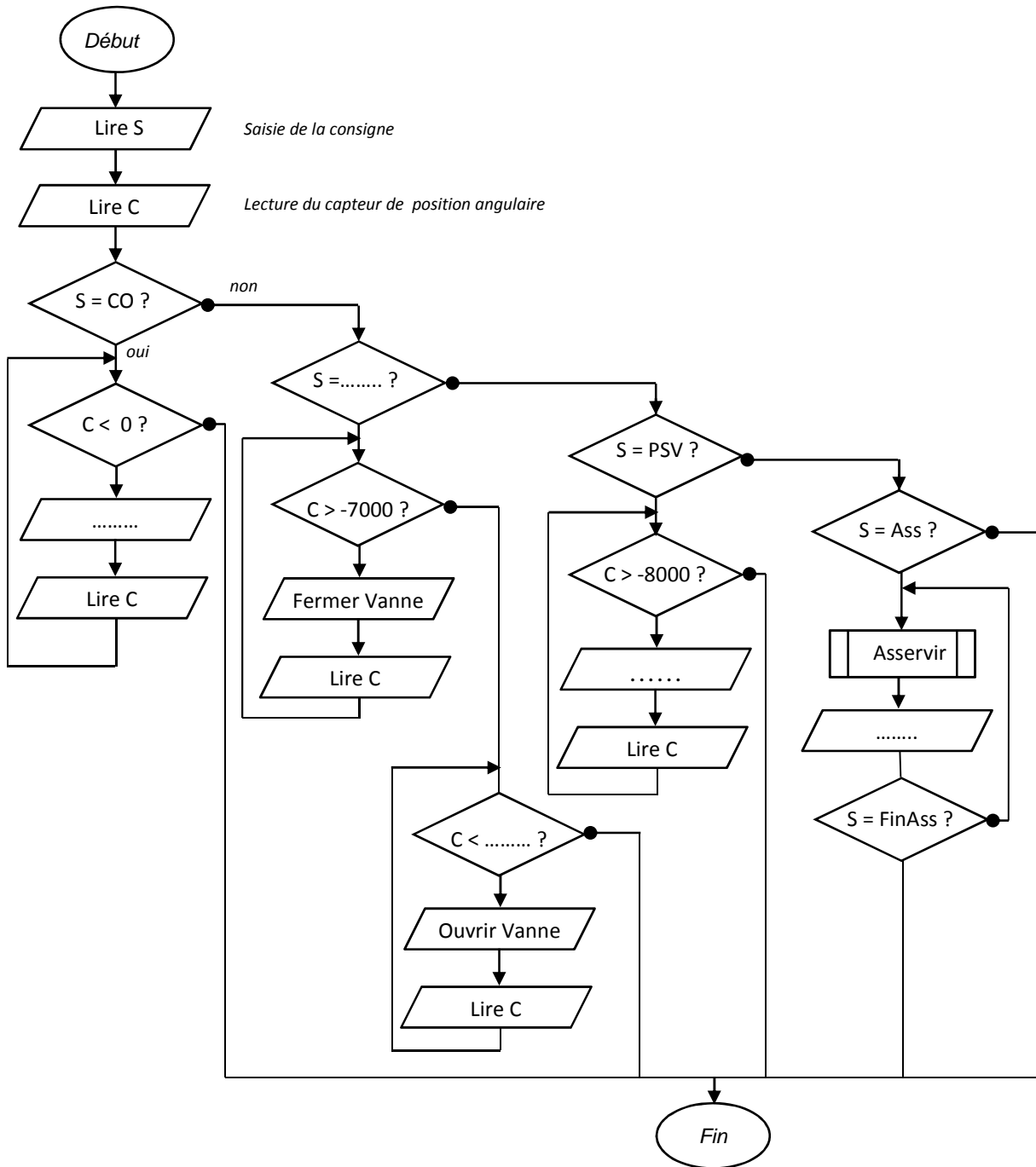




un lien de puissance véhicule deux informations dont le produit est une puissance ; exemple  $U$  et  $I$  dans le domaine électrique  
 un lien d'information véhicule une seule information ; exemple  $U$  dans le domaine électrique

# Document réponse DR3

Position de la vanne	Position en degré ( $\beta$ )	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	



## Caractéristiques des éléments électriques

Désignation des sous-circuits	Puissance utile installée	Tension	Rendement	Facteur de puissance (cos $\varphi$ )	Puissance active	Puissance réactive
Moteurs de pompe hydraulique pour les vannes secteurs	30 kW	400 V	0,85	0,8		
Ventilation des locaux techniques	5,8 kW	400 V	0,7	0,8		
Éclairage de sécurité	1,5 kW	230 V	1	1	1,5 kW	0
Calculateurs, supervision, surveillance vidéo, communication	5,6 kW	230 V	1	1		
Éclairage des locaux techniques et des passerelles de maintenance	3,3 kW	230 V	1	1		