

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**

Proposition de réponses attendues version 1

(Format candidat)

Auteurs du sujet et des réponses

Antoine Éon

Philippe Fichou

Jacques Le Goff

Jean-Yves Loussouarn

Gaëtan Maléjacq

Philippe Soutif

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

R1. Une marée haute ayant un coefficient 70 présentera une hauteur d'eau de 5,1 m, le niveau moyen des fonds ne doit donc pas dépasser cette valeur.

| Zone | Surface (m ²) | Niveau initial (m) | Niveau final (m) | Volume à extraire (m ³) |
|------|---------------------------|--------------------|------------------|-------------------------------------|
| A | xx | < 4 | xx | 0 |
| B | 360000 | 5,2 | 0,1 | 36000 |
| C | 305000 | 5,5 | 0,4 | 122000 |
| D | 235000 | 6,5 | 1,4 | 329000 |
| E | 310000 | 7,1 | 2,0 | 620000 |
| F | 250000 | 7,0 | 1,9 | 475000 |
| G | 530000 | 6,1 | 1,0 | 530000 |

Total : 2 112000 m³

Le volume de sédiment à extraire sur la surface considérée est de **2,1 millions de mètres cubes**.

R2. Calcul simplifié de l'empreinte carbone des deux projets

Extraction mécanique des 40 millions de m³ : 32 000 tonnes équivalent carbone.

Construction et fonctionnement du barrage sur 50 ans : 5 250 tonnes équivalent carbone.

Une extraction d'envergure de l'excès de sédiments par des moyens mécaniques est une solution technique viable mais non pérenne. Ce procédé ferait en outre subir un traumatisme supplémentaire sur l'écosystème de la baie. Avec la solution du barrage de chasse, l'homme va rendre à la nature l'initiative de modeler le paysage. Cette restitution est en parfaite adéquation avec les prérogatives environnementales recherchées dans ce projet.

R3. Voir le document réponse DR1

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.

R4. Notons q_v le débit d'eau traversant une vanne. Si l'on note S la section de passage et en fonction de l'hypothèse de l'uniformité du champ de vitesse dans cette section, on a

$$q_v = Sv(B/R_0)$$

Si l'on note h la hauteur de la section de passage de l'eau, et en tenant compte de l'expression de la vitesse uniforme dans la section donnée dans le sujet, la relation ci-dessus devient

$$q_v = L \times h \times \sqrt{2 \times g \times (y_A - y_B)}$$

Numériquement, on trouve pour chacune des deux situations proposées dans le sujet :

Cas 1 : $y_A = 6,5 \text{ m}$

$$\begin{aligned} q_v &= 9 \times (2,15 - 2) \times \sqrt{2 \times 9,81 \times (6,5 - 2,15)} \\ &= 12,47 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

Cas 2 : $y_A = 4 \text{ m}$

$$\begin{aligned} q_v &= 9 \times (2,236 - 2) \times \sqrt{2 \times 9,81 \times (4 - 2,236)} \\ &= 12,49 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

On en déduit, si l'on note Q_v le débit total pour les huit vannes, que pour les cas 1 et 2, le débit en début de phase de sous-verse est tel que

$$Q_v \approx 100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Nous n'avons pas tenu compte du débit à assurer pour les passes à poissons : le Couesnon participe à ce dernier. Par ailleurs, le débit de chasse est régulé par l'ouverture ou la fermeture des vannes-secteurs. En phase de sous-verse, le débit supplémentaire du Couesnon :

- remplit la réserve d'eau du barrage lorsque le débit visé est atteint (notamment en début de phase sous-verse) ;
- s'ajoute au débit de sous-verse lorsque celui-ci est inférieur au débit visé et prolonge ainsi le phénomène de chasse.

R5. L'effet de la forme du nez de pile est significatif. La situation la plus défavorable est manifestement la forme rectangulaire. En effet, celle-ci entraîne un ralentissement, voire une annulation de la vitesse du fluide le long de la pile. Cela aura pour effet de réduire considérablement le phénomène de chasse attendu par ce barrage.

La forme cylindrique, quant à elle, est moins contraignante sur la baisse de la vitesse le long de la paroi de la pile (valeur moyenne de l'ordre de 4 à 5 m/s). Un phénomène d'amplification locale apparaît au début de la jonction du demi-cylindre avec les plans. Celui-ci peut entraîner des turbulences et, à long terme, générer une érosion des piles à ce niveau.

La forme elliptique permet un écoulement plus régulier du fluide avec une vitesse de 6 m/s pratiquement constante tout le long de la pile.

On remarquera le phénomène de fluide « statique » à l'arrière des piles et ce, quelle que soit la forme du nez. Pour éviter cela, une diminution progressive de la section aval de la pile, à l'instar d'une aile d'avion, aurait été requise.

R6. Voir document réponse DR3

Le codeur est relié sur un Bus CAN pour une exploitation numérique de ses grandeurs de sortie. Compte-tenu de son intégration dans la structure, l'association des grandeurs

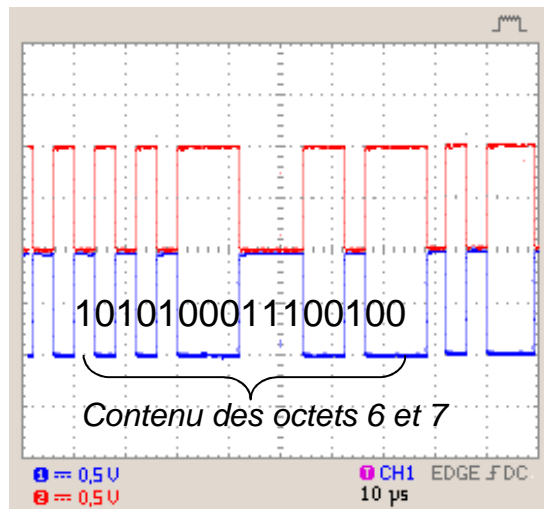
souhaitées par rapport aux positions de la vanne impose une mesure sur l'axe z du composant avec une plage de $\pm 90^\circ$.

Seul le composant ayant la référence NBN65-S0/0/90C3 convient donc à cette application.

R7. Voir document réponse DR3

R8. La durée de transmission d'un bit est de $4 \mu\text{s}$, soit un débit de 250 kbit/s utilisé sur la ligne CAN.

La valeur E4A8h relevée sur cet oscillogramme correspond à un angle de -70° mesuré par l'inclinomètre, soit une position fermée de la vanne.



R9. Voir document réponse DR3

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 ;

R10. Lorsque l'on se place à la limite de la rupture de l'appui plan entre le palier et la plaque, il y a une répartition linéaire des allongements des tirants AA' et BB' car le palier pivote autour de l'axe (I, \vec{z}_1) .

Cela implique une répartition linéaire des efforts \vec{F}_1 et \vec{F}_2 car Les tirants se comportent comme des ressorts de même raideur k :

$$\boxed{F_1 = k \cdot AA'} \quad \text{et} \quad \boxed{F_2 = k \cdot BB'}$$

Grâce au théorème de Thalès, on peut écrire : $\boxed{\frac{F_1}{F_2} = \frac{L_1}{L_2}} \quad (1)$

R11. Cas du modèle 1

On isole le palier 4.

Inventaire des actions mécaniques extérieures :

- poids du palier négligé ;
- action de la pile ;
- action du bras de vanne ;
- action des 3 tirants bas ;
- action des 3 tirants hauts.

Théorème du moment dynamique appliqué au palier immobile au point I et en projection sur \vec{z}_1 :

$$0 + \vec{M}(O, \text{palier} \rightarrow \text{vanne}) \cdot \vec{z}_1 + \vec{M}(O, \text{tirants bas} \rightarrow \text{vanne}) \cdot \vec{z}_1 + \vec{M}(O, \text{tirants hauts} \rightarrow \text{vanne}) \cdot \vec{z}_1 = 0$$

Avec, en utilisant les bras de levier :

$$\vec{M}(O, \text{palier} \rightarrow \text{vanne}) \cdot \vec{z}_1 = \|\vec{R}_y\| \cdot L_0$$

$$\vec{M}(O, \text{tirants bas} \rightarrow \text{vanne}) \cdot \vec{z}_1 = -\|\vec{F}_1\| \cdot L_1$$

$$\vec{M}(O, \text{tirants hauts} \rightarrow \text{vanne}) \cdot \vec{z}_1 = -\|\vec{F}_2\| \cdot L_2$$

Ce qui nous conduit à :

$$\boxed{-R_y \cdot L_0 - F_1 \cdot L_1 - F_2 \cdot L_2 = 0} \quad (2)$$

Cas du modèle 2

On isole le palier 4.

Inventaire des actions mécaniques extérieures :

- poids du palier négligé ;
- action de la pile ,
- action du bras de vanne ;
- action des 3 tirants bas ;
- action des 3 tirants hauts.

Théorème de la résultante dynamique appliqué au palier immobile en projection sur \vec{x}_1 :

$$\vec{R}(O, \text{palier} \rightarrow \text{vanne}) \cdot \vec{x}_1 + \vec{R}(O, \text{tirants bas} \rightarrow \text{vanne}) \cdot \vec{x}_1 + \vec{R}(O, \text{tirants hauts} \rightarrow \text{vanne}) \cdot \vec{x}_1 = 0$$

$$\boxed{R_x + 2 \cdot F_3 = 0} \quad (3)$$

Les 3 équations obtenues nous permettent de déterminer :

$$F_1 = -\frac{L_1 \cdot R_y \cdot L_0}{(L_1^2 + L_2^2)} = \boxed{11992 \text{ daN}}, \quad F_2 = -\frac{L_2 \cdot R_y \cdot L_0}{(L_1^2 + L_2^2)} = \boxed{63515 \text{ daN}} \quad \text{et}$$

$$F_3 = -\frac{R_x}{2} = \boxed{102500 \text{ daN}}$$

R12. On a :

$$\|\vec{F}_{haut}\| = F_2 + F_3 = \boxed{166000 \text{ daN}} \quad \text{et} \quad \|\vec{F}_{bas}\| = F_1 + F_3 = \boxed{114500 \text{ daN}}$$

Ces résultats correspondent aux normes minimales des efforts des 3 tirants hauts et des 3 tirants bas sur le palier de vanne permettant d'éviter la rupture de l'appui plan entre le palier et la plaque de positionnement.

Or, on a :

$$\boxed{166000 \text{ daN} < 3 \times 4,2 \cdot 10^6 \text{ N}} \quad \text{et} \quad \boxed{114500 \text{ daN} < 3 \times 4,2 \cdot 10^6 \text{ N}}$$

L'effort de précharge des tirants permet donc d'assurer le maintien en position du palier de vanne y compris dans des conditions extrêmes d'utilisation car un coefficient de sécurité de 10 a été prévu.

R13. Pression de contact obtenue à partir du premier modèle

$$p_{contact} = \frac{6 \times F}{S_{contact}} = \frac{6 \times 4,2 \cdot 10^6}{2,97} = 8484848 \text{ Pa}$$

$$p_{contact} = 8,48 \text{ MPa}$$

Comparaison des résultats : le second modèle montre que la pression de contact n'est pas uniforme sur la surface d'appui S. Elle varie de 0 à 19,4 MPa. C'est à proximité des trous de passage des tirants que la pression est maximale. Cette pression maximale est largement supérieure à la pression de contact obtenue à partir du premier modèle.

Conclusion : les deux modèles vérifient la condition de résistance ($p_{maxi} < 40 \text{ MPa}$). Cependant le premier modèle, trop éloigné du réel, s'avère ici inapproprié.

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.

R14. Voir le document réponse DR2

R15. Dans le triangle rectangle en H, (O,C,H), le côté CH est donné par la relation

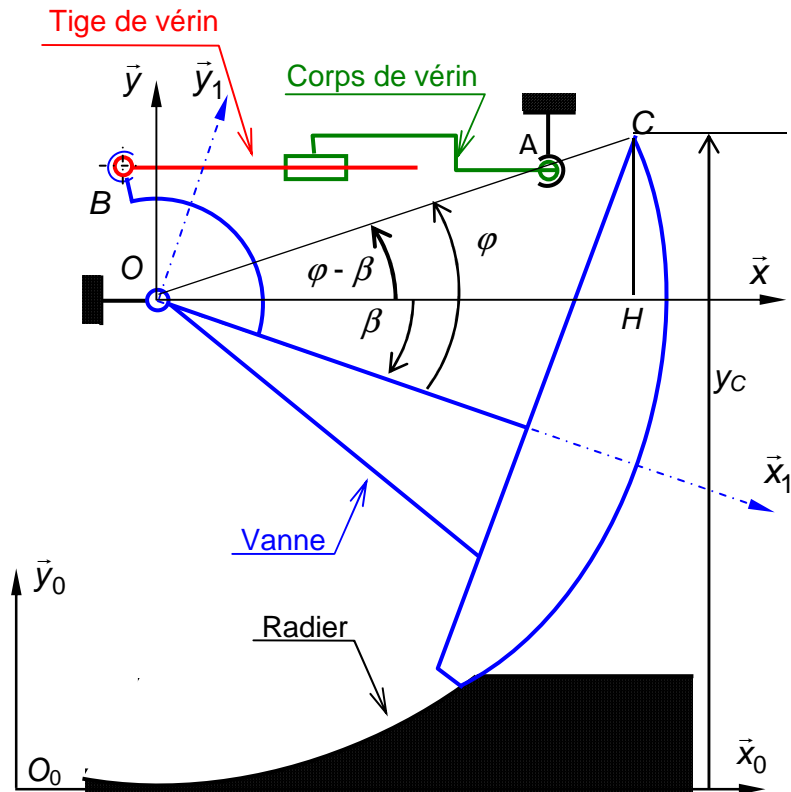
$$CH = R \sin(\varphi - \beta)$$

On en déduit la hauteur de la vanne $y_C = y_O + CH$

C'est-à-dire $y_C = y_O + R \sin(\varphi - \beta)$

Numériquement on obtient la relation à entrer dans le logiciel

$$y_C = 7,5 + 7 \times \sin(38,25 - \beta) \quad \beta \text{ en degré}$$



R16. Il s'agit en effet d'un système asservi car il existe une **boucle de rétroaction négative** de la position mesurée de la hauteur de la vanne qui vient en comparaison de la consigne de hauteur. Cette différence est ensuite corrigée pour la commande des distributeurs hydrauliques.

La variable asservie du modèle est la **hauteur de la vanne**.

R17. En reprenant le tableau du sujet et en ajoutant une colonne « valeur mesurée », relevée ou calculée à partir du document technique DT5

| Critère du cahier des charges | Niveau du cahier des charges | Valeur mesurée |
|--|--------------------------------|---|
| Heure t_0 du début de sur-verse | PM - 10 minutes (5 h 41 min) | 5 h 09 |
| Temps total de remplissage par sur-verse | 1 h 30 minutes | 6 h 33 min - 5 h 09 min = 1 h 24 min |
| Niveau du Couesnon en fin de remplissage | 5,39 m (IGN69) | 5,38 m |
| Niveau de remplissage par sur-verse | entre 5,90 m et 4,60 m (IGN69) | 5,58 m |
| Volume d'eau apporté par la mer en sur-verse | 979 040 m ³ | ≈ 900000 m ³ |

Calcul du volume d'eau apporté par la mer par sur-verse

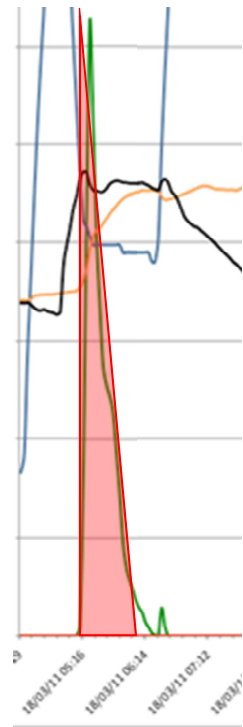
Assimilons la forme du débit de sur-verse à un triangle de base (6 h 09 min - 5 h 09 min) et de hauteur 62 m³/s (voir figure ci-contre).

On en déduit une estimation du volume d'eau accumulé par sur-verse :

$$V = \frac{(6,15 - 5,15) \times 3600 \times 62}{2} = 111600 \text{ m}^3$$

Comme il y a 8 vannes, le volume total accumulé est d'environ

$$V_t = 8 \times 111600 \approx 900000 \text{ m}^3$$



On constate que les écarts pour les 5 critères étudiés ici sont relativement faibles vues les caractéristiques du support. En effet, s'agissant d'un barrage hydraulique avec les aléas liés aux effets naturels imprévisibles totalement dans un cahier des charges bien en amont de l'exploitation de l'ouvrage, les valeurs mesurées sont parfaitement acceptables. Seul l'écart sur l'heure de début de sur-verse est surprenant car il est parfaitement gérable ici. Sans doute que d'autres considérations (comme la mesure de turbidité) peuvent expliquer cette valeur.

R18. Pour simuler le comportement d'un vérin, les paramètres fondamentaux sont **ses sections en sortie de tige et en rentrée de tige**. En effet, dans le cas d'une sortie de tige, par exemple, la puissance qui « entre » dans le vérin est une puissance hydraulique telle que

$$P_h = p \times q_v$$

si p est la pression à l'entrée du vérin et q_v le débit du fluide circulant dans la canalisation d'entrée. Par ailleurs, la puissance mécanique fournie par la tige de vérin se déplaçant à la vitesse v par rapport au corps de vérin au bras est telle que

$$P_m = F \times v$$

si F est l'effort de poussée de cette tige.

Si l'on suppose la conservation de la puissance, on a

$$p \times q_v = F \times v$$

Le paramètre du vérin caractérisant ce principe est bien la section comme le montre la relation ci-dessous

$$\boxed{\frac{F}{p} = \frac{q_v}{v} = S}$$

issue de la conservation de la puissance dans le vérin.

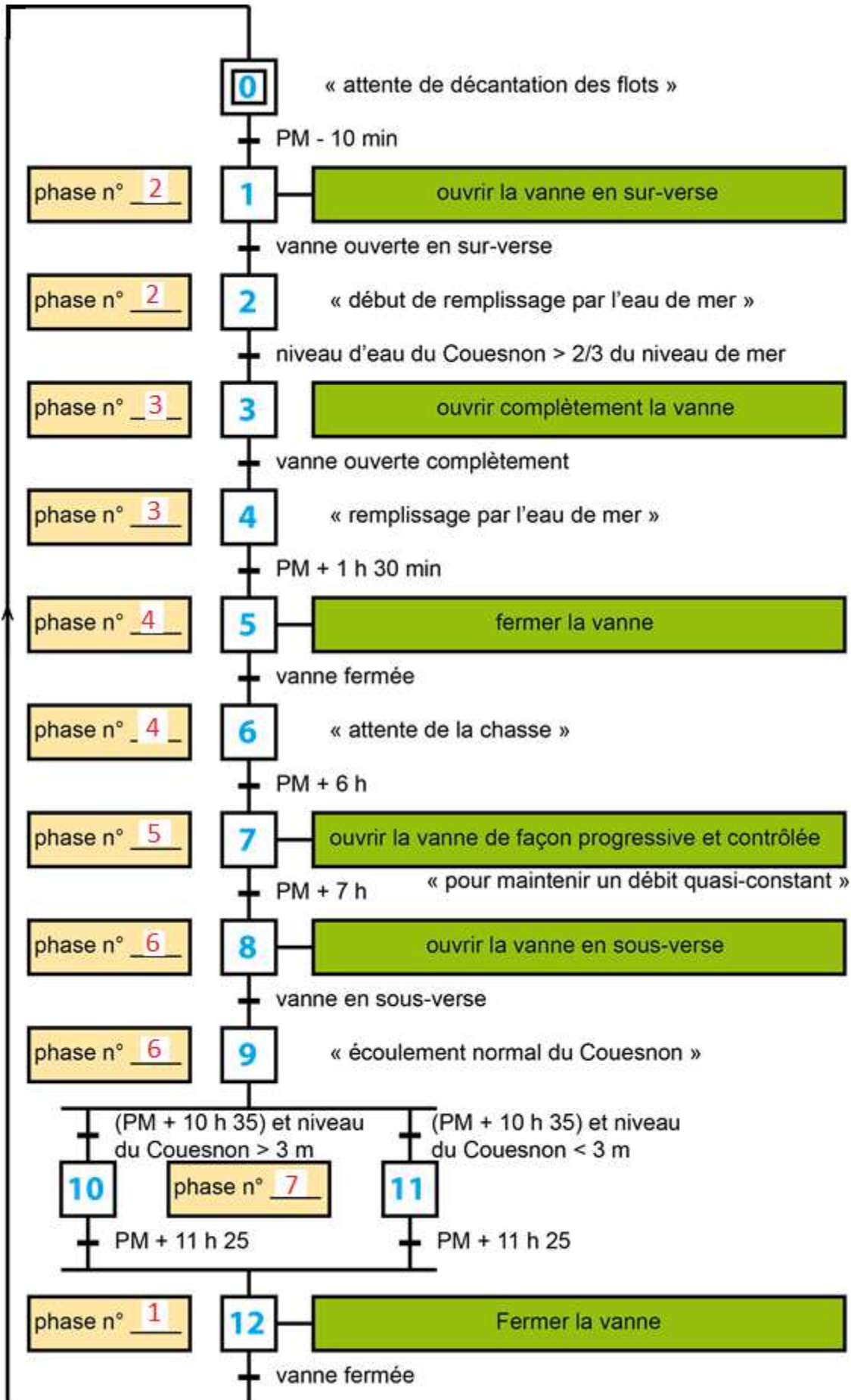
Si l'on veut être plus précis dans la description du vérin, on peut tenir compte des pertes hydraulique et mécanique (rendement), du volume mort dans les chambres, de la

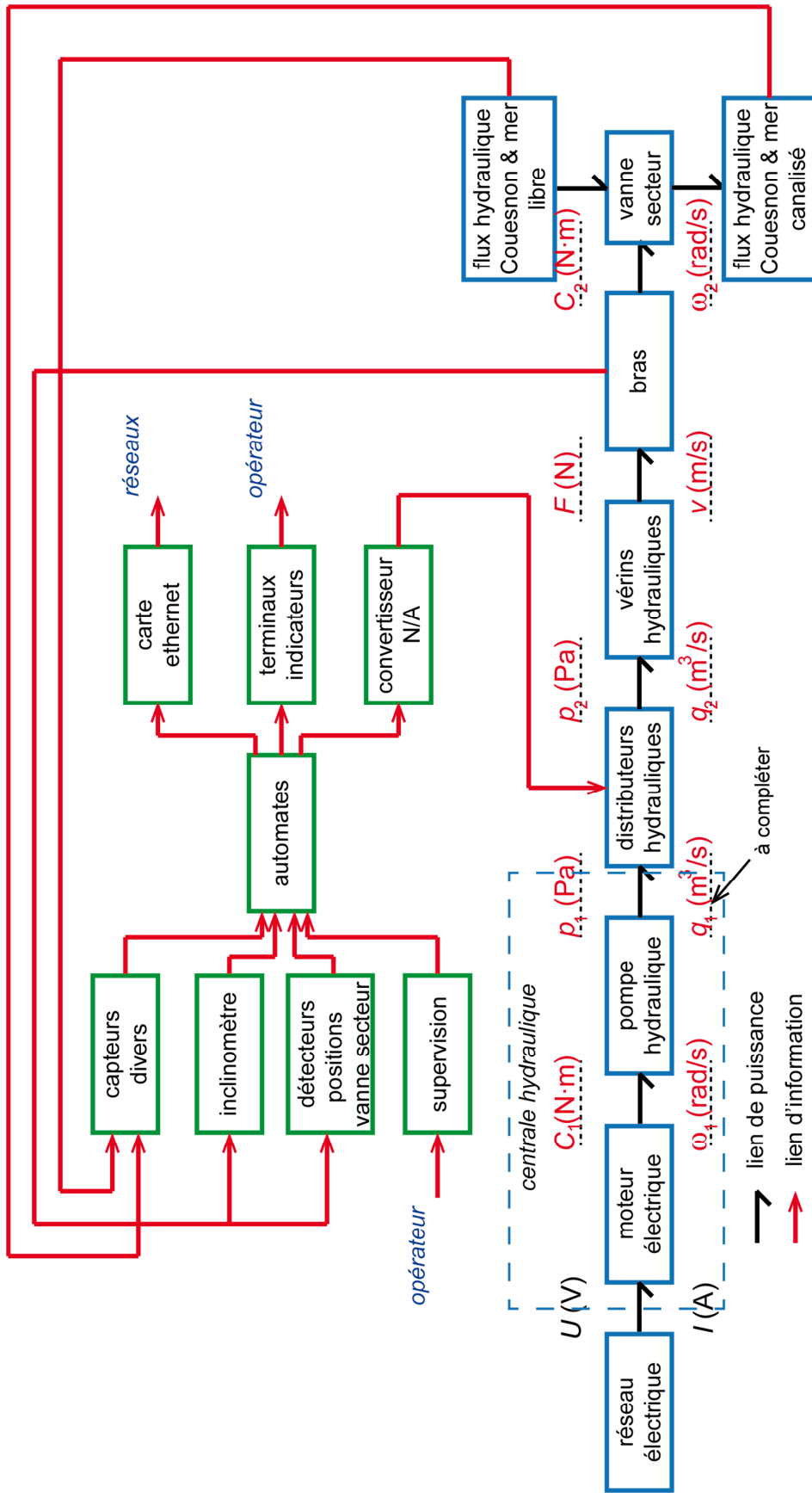
Un « pixel » ayant une surface de $\frac{78400}{100} = 784 \text{ m}^2$, nous pouvons *estimer* que la superficie passée sous l'altitude de 5 m (IGN69) entre le 12 février 2009 et le 18 avril 2011 est d'environ $355 \times 784 = 0,28 \text{ km}^2$.

Le but étant de « récupérer » environ $1,5 \text{ km}^2$ de mer sur les terres, en un peu plus de deux ans, un peu moins de 20 % du travail a déjà été réalisé. Vu les aléas dans le domaine, il est difficile de prévoir le moment où l'objectif final sera atteint, mais à ce rythme, cela devrait être réalisé vers 2019.

R21. Le cahier des charges prévoit de déplacer plus de 2 millions de mètres cubes de sédiments pour rendre son caractère maritime au Mont-Saint-Michel. La solution du barrage est pertinente d'un point de vue environnemental (carbone et sécurité) mais aussi d'un point de vue technique comme vérifié ici. En effet, les effets des chasses successives avec les débits annoncés et validés conduisent déjà, après 3 ans de fonctionnement, à observer les effets attendus.

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 | -37 | -3700 | F18C |
| Fermée | -20 | -70 | -7000 | E4A8 |
| Ouverte en sous-verse | -10 | -80 | -8000 | E0C0 |

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 |
| 2F _h | 01 _h | 20 _h | 00 _h | 03 _h | xx | xx | xx |

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 |
| 2F _h | 00 _h | 60 _h | 00 _h | 0A _h | xx | xx | xx |

Algorithme Contrôle d'une vanne

Lire Consigne ;

Lire Codeur ;

Suivant Consigne Faire

```

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

  TantQue Codeur < -7000
  | Ouvrir_Vanne ;
  | Lire Codeur ;
  FinTantQue ;

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

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

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

FinSuivant ;

Fin algorithme