

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 3

- **texte** pages 2 à 12
 - Partie 1 : réponse au besoin*
 - Partie 2 : génération et régulation du flux hydraulique*
 - Partie 3 : modélisation du comportement dynamique du barrage*
 - Partie 4 : analyse d'écart entre le souhaité, le simulé et le réalisé*
 - Partie 5 : conclusion sur la problématique du sujet*
- **documents techniques** pages 13 à 15
- **documents réponses** pages 16 à 19

Le sujet comporte 17 questions.

Les documents réponses DR1 à DR4 seront à rendre agrafés avec les copies.

Rétablissement du caractère maritime du Mont-Saint-Michel

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.**

Le Mont-Saint-Michel est érigé dans une baie aux paysages et aux écosystèmes remarquables.



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

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 confirmés par des mesures scientifiques régulières.



Figure 2 : barrage sur le Couesnon en action

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. 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.

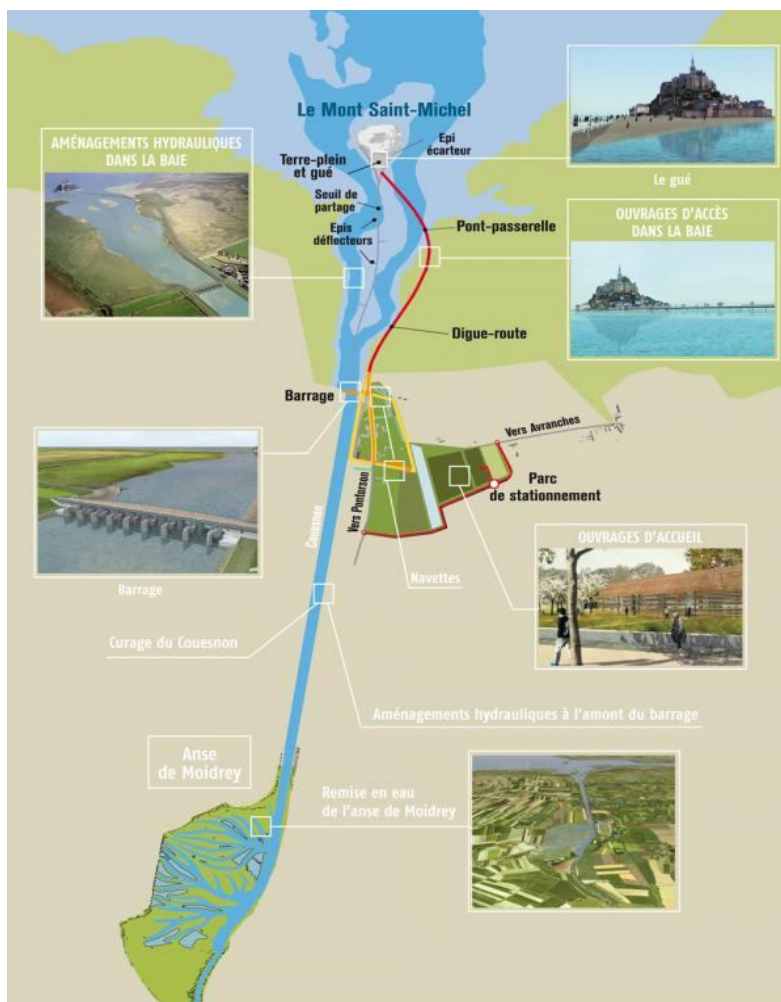


Figure 3 : vue d'ensemble de la zone du Couesnon

² Appui d'extrémité du barrage sur la berge

Partie 1 : réponse 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.

Volume des sédiments

À l'heure actuelle, l'insularité du Mont n'est observée qu'une cinquantaine de jour par an lorsque les coefficients³ 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.**

Sur la figure 4 est donné un découpage des zones de niveaux référencées en IGN69⁴ sur un secteur circulaire arbitrairement choisi à 1 km de rayon.

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

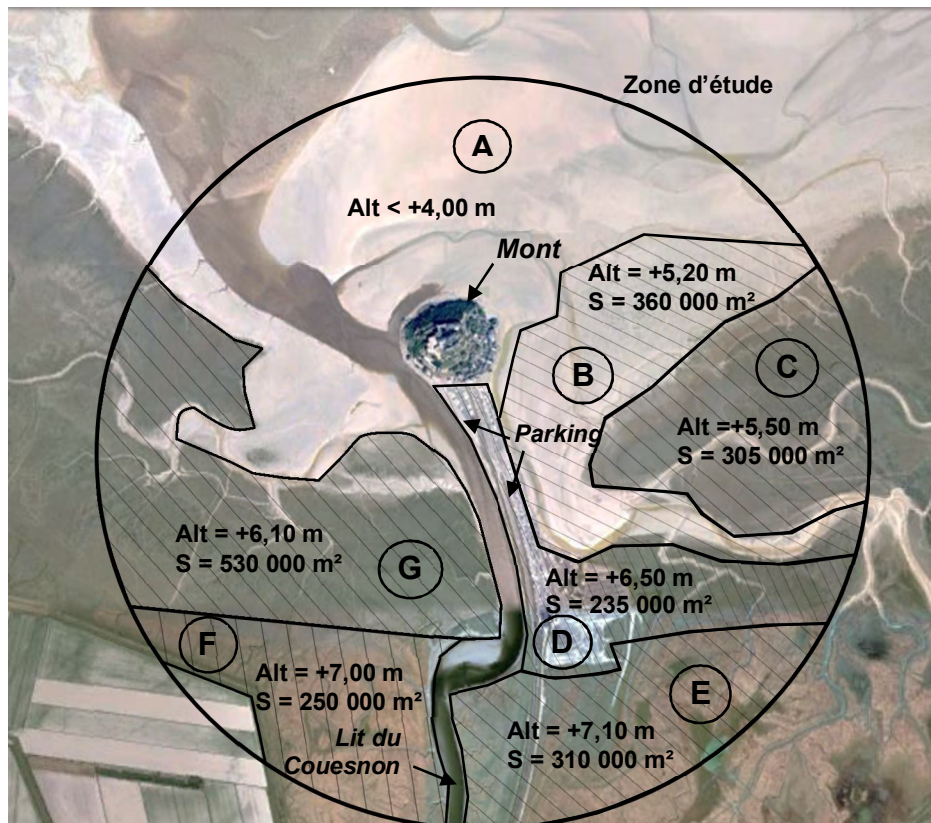


Figure 4 : découpage de zones autour du Mont-Saint-Michel à hauteurs différentes

Q1. Déterminer, la hauteur d'eau référencée en IGN69 qui permettra au Mont-Saint-Michel de retrouver son caractère insulaire au moins 180 jours par an. **En déduire** la hauteur puis le volume de sédiments à déplacer par zone. **En déduire** le volume global pour satisfaire cette exigence dans la zone d'étude.

³ Amplitude du marnage par rapport à sa valeur moyenne. Exprimé en centièmes, il évolue de 20 à 120.

⁴ 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 dragage⁵ d'envergure d'une part puis celui engendré par la construction et par le fonctionnement du barrage d'autre part.

Sur 50 ans, avec le **réensablement**, 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.



Figure 5 : vue future du Mont-Saint-Michel

Solution 1 : sur 50 ans extraction mécanique des 40 millions de m³. Cette solution a été jugée trop coûteuse et ne présentait pas l'avantage d'être une solution pérenne.

Solution 2 (projet actuel retenu) :

- **construire un barrage** capable de réactiver et de renforcer le travail de chasse⁶ 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 million⁷ 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 en une année ;
- 1 MWh d'énergie électrique produit en France émet 25 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.

⁵ Opération qui consiste à enlever les matériaux situés dans le fond des plans d'eau.

⁶ Rejet au large.

⁷ Ce volume inclut la suppression de la digue-route.

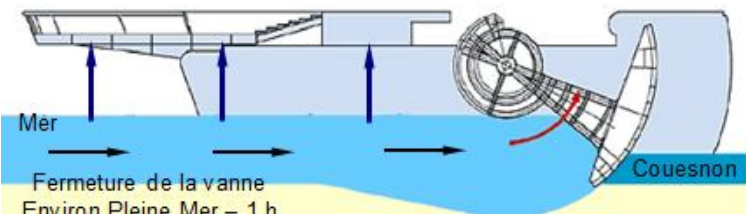
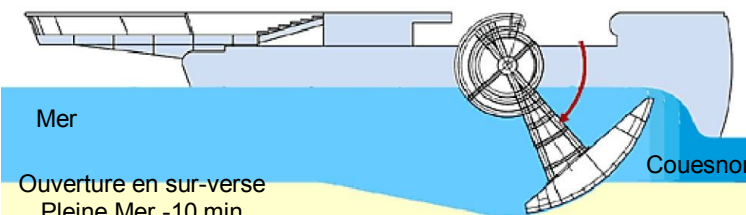
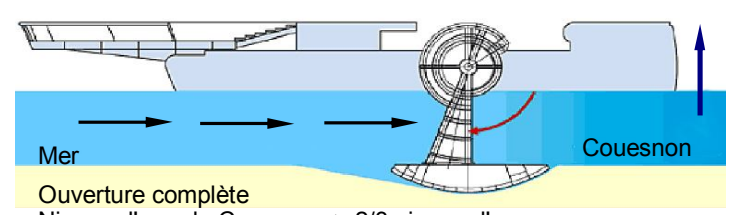
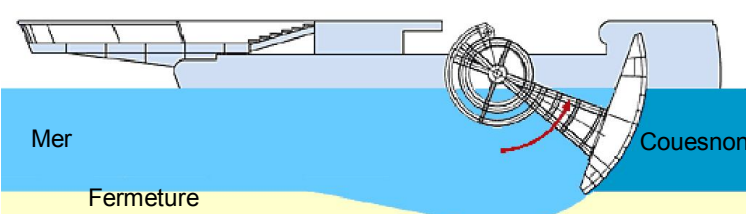
Partie 2 : génération et régulation du flux hydraulique

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 et principe de l'effet de chasse

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.

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</p> <p>Fermeture de la vanne Environ Pleine Mer - 1 h</p> <p>Couesnon</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</p> <p>Ouverture en sur-verse Pleine Mer - 10 min</p> <p>Couesnon</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</p> <p>Ouverture complète Niveau d'eau du Couesnon > 2/3 niveau d'eau mer</p> <p>Couesnon</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</p> <p>Fermeture Pleine Mer + 1 h 30</p> <p>Couesnon</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>

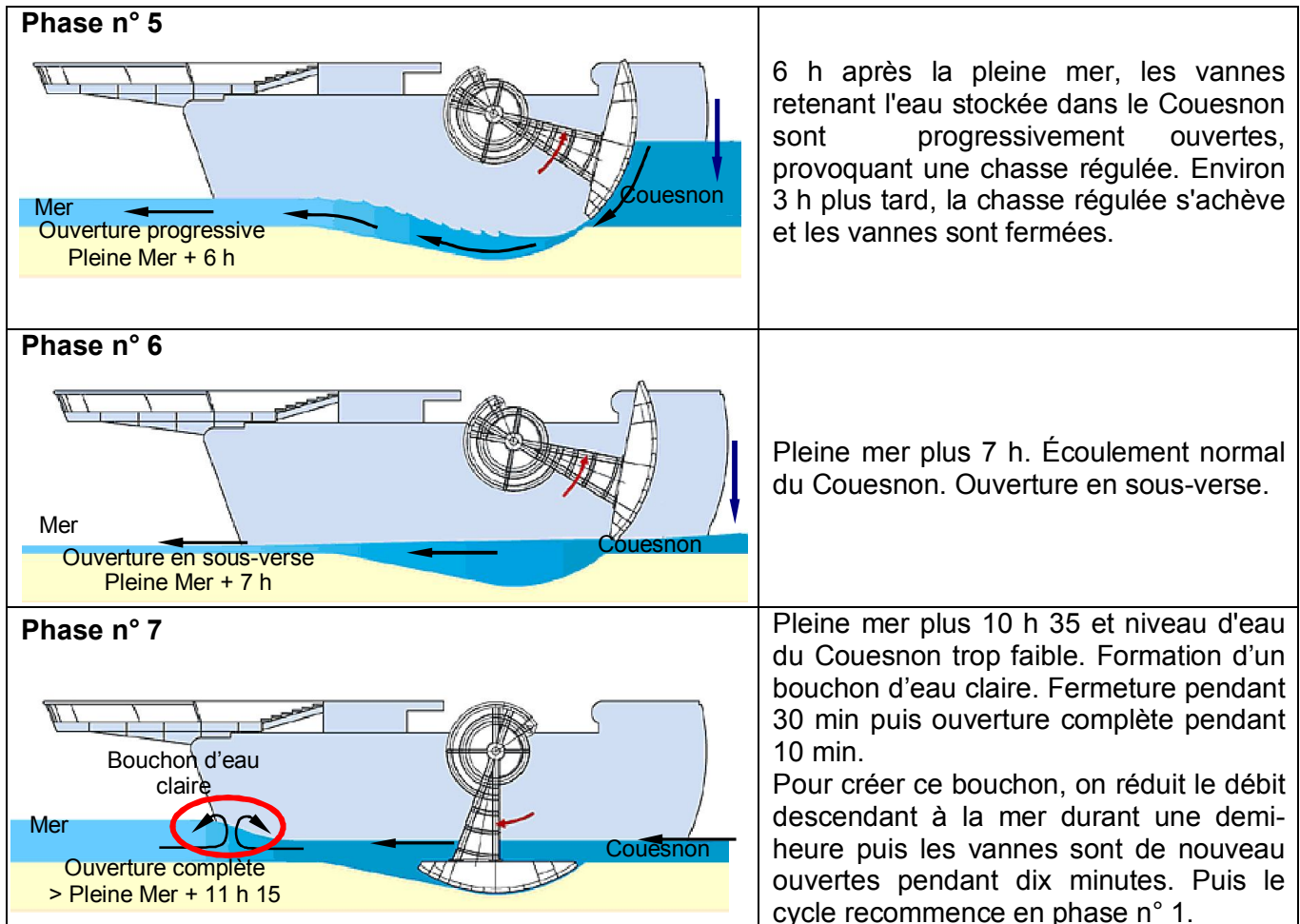


Figure 6 : phasage du fonctionnement du barrage

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.

Q4. Compléter les chronogrammes d'ouverture et fermeture des vannes sur le document réponse DR2 sachant que :

- Le temps de passage de sous-verse à fermée est : 1 min
- Le temps de passage de fermée à ouverture complète est : 9 min

Partie 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.

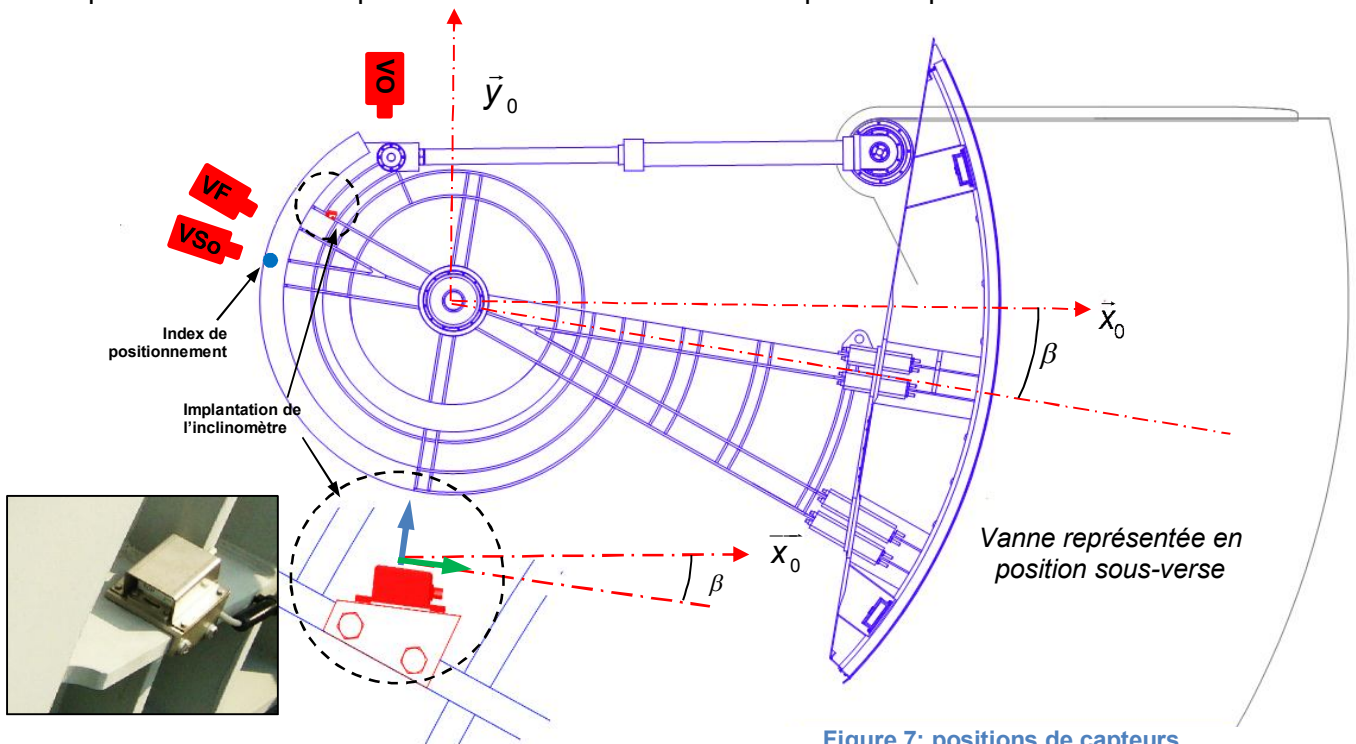
Détection et codage de la position des vannes

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.

Position de la vanne	Capteur TOR	Angle (β)
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 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.



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.

Consignes de position de la vanne

CO	Consigne de position d'ouverture maximum (la vanne doit s'ouvrir à son maximum)
CF	Consigne de position de fermeture (la vanne doit se fermer)
PSV	Consigne d'ouverture en sous-verse
Ass	Une consigne de position est donnée, et la vanne est asservie à cette position
FinAss	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.

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

Détermination de la puissance du groupe hydraulique nécessaire pour le déplacement des vannes.

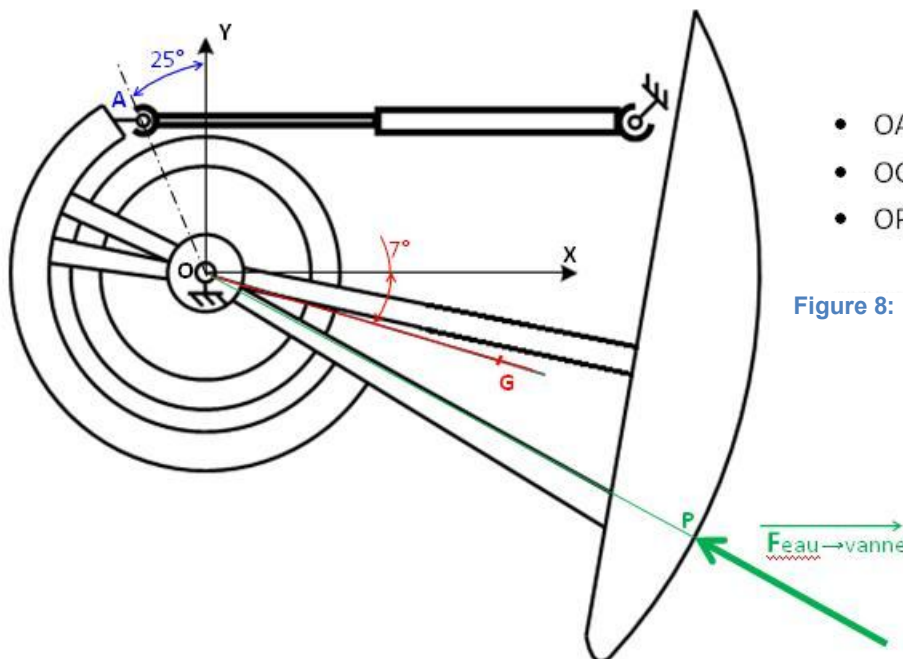
Le barrage comporte 8 passes et chaque passe comporte une vanne actionnée par 2 vérins.

L'action mécanique exercée par l'eau sur la vanne est fonction de la hauteur d'eau stockée en amont et en aval (résultante \vec{F} au point P).

Le torseur de l'action mécanique de l'eau sur la vanne au point o s'écrit :

$$To(eau \rightarrow vanne) = \left\{ \begin{array}{c} \vec{F}(eau \rightarrow vanne) \\ \vec{O} \end{array} \right\}_o = \left\{ \begin{array}{cc} -110651 & 0 \\ 774787 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} \right\}_{(o, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})}$$

L'action maximum de poussée se fait lorsque la vanne est dans la position ci-dessous.



- OA = 2.44 m
- OG = 4 m
- OP = 7 m = rayon vanne

Figure 8: paramétrage d'une vanne-secteur en position maxi

Hypothèses :

- le problème se ramène à un problème plan,
- le poids de la vanne, d'une valeur de 400 000 N, s'applique au centre de gravité G,
- la vitesse de sortie de la tige du vérin sera prise égale à 0,001 m s⁻¹,
- le rendement d'un vérin est de 90%.

Q7. Recenser les torseurs des actions mécaniques appliquées à la vanne puis appliquer le théorème du moment statique au point O. **En déduire** l'effort que doit développer chaque vérin pour déplacer la vanne.

Q8. Conclure sur la nécessité ou non 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.

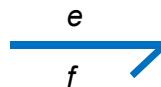
Q9. Déterminer la puissance maximum que doit fournir le groupe hydraulique en admettant que les 8 vannes s'ouvrent ensemble.

Partie 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 :



Q10. Indiquer sur le document réponse DR4 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 .

La maquette numérique du système de manœuvre d'une vanne-secteur, 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.

Q11. Préciser, à partir du DT1, les grandeurs physiques d'entrée et de sortie de la vanne-secteur. **Donner** les principaux paramètres de la maquette numérique importés par le logiciel de simulation.

Q12. Justifier, à partir du document technique DT1, que ce système est asservi. Préciser la grandeur physique asservie sur le modèle.

Q13. Indiquer les paramètres indispensables à renseigner dans le modèle pour simuler le comportement d'un des vérins. **Donner** un paramètre pouvant rendre le comportement d'un vérin plus proche du réel.

Analyse des écarts lors d'une journée d'exploitation

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. Nous ne nous intéressons ici qu'à la première marée comprise entre 4 h 19 et 16 h 42. Le document technique DT2 précise l'évolution des valeurs mesurées de cinq paramètres d'une vanne-secteur. Le tableau ci-dessous précise quelques critères du cahier des charges.

Critère	Niveau
1. Heure t_0 du début de sur-verse	5 h 20 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. Débit maximal en sur-verse	$75 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
5. Heure t_f de fin de sur-verse	6 h 50 minutes

Q14. Evaluer, à l'aide du DT2, les écarts entre le souhaité (cahier des charges) et le réalisé (mesures) pour les 5 critères du cahier des charges énoncés ci-dessus. **Proposer** des arguments permettant de justifier les valeurs de ces écarts.

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 9 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.

Q15. 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.

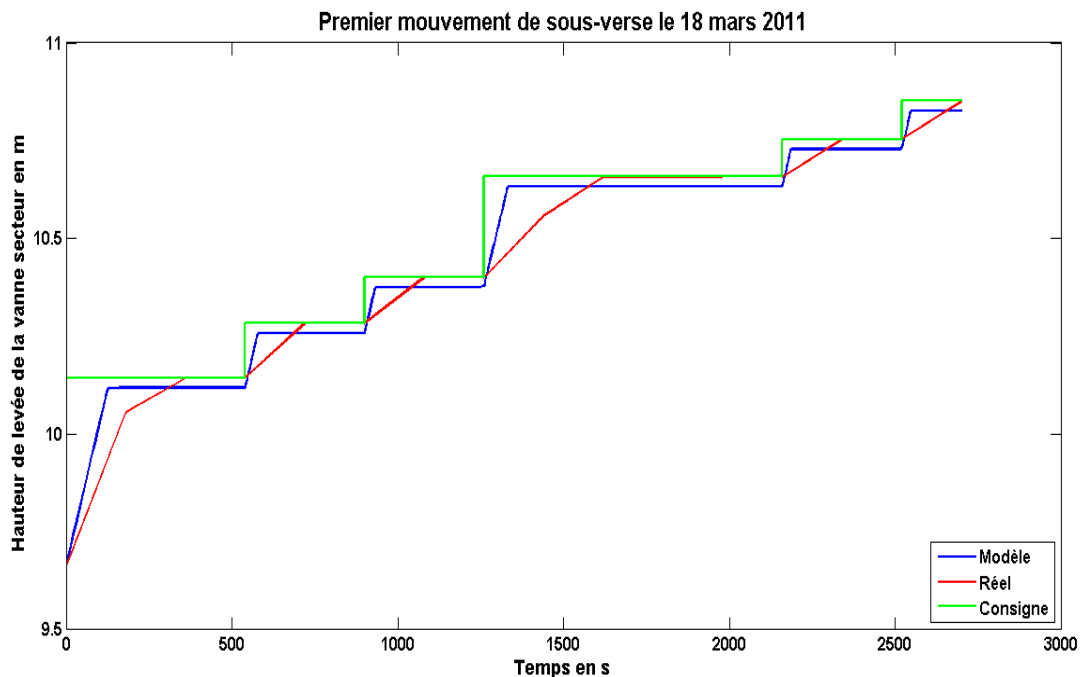


Figure 9 : mouvement de sous-verse d'une vanne le 18 mars entre 11 h 54 et 12 h 36

Partie 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 10 ci-après montre deux vues prises par télédétection laser⁸ 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.

Q16. 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**.

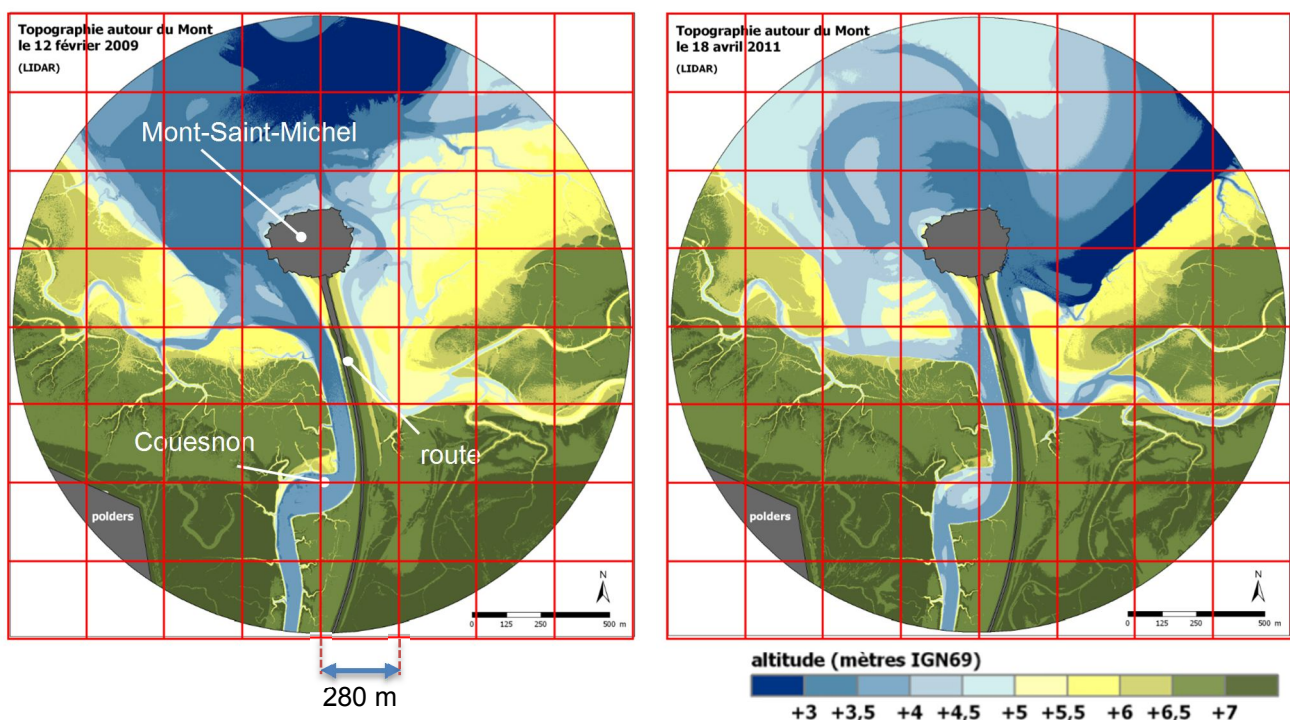


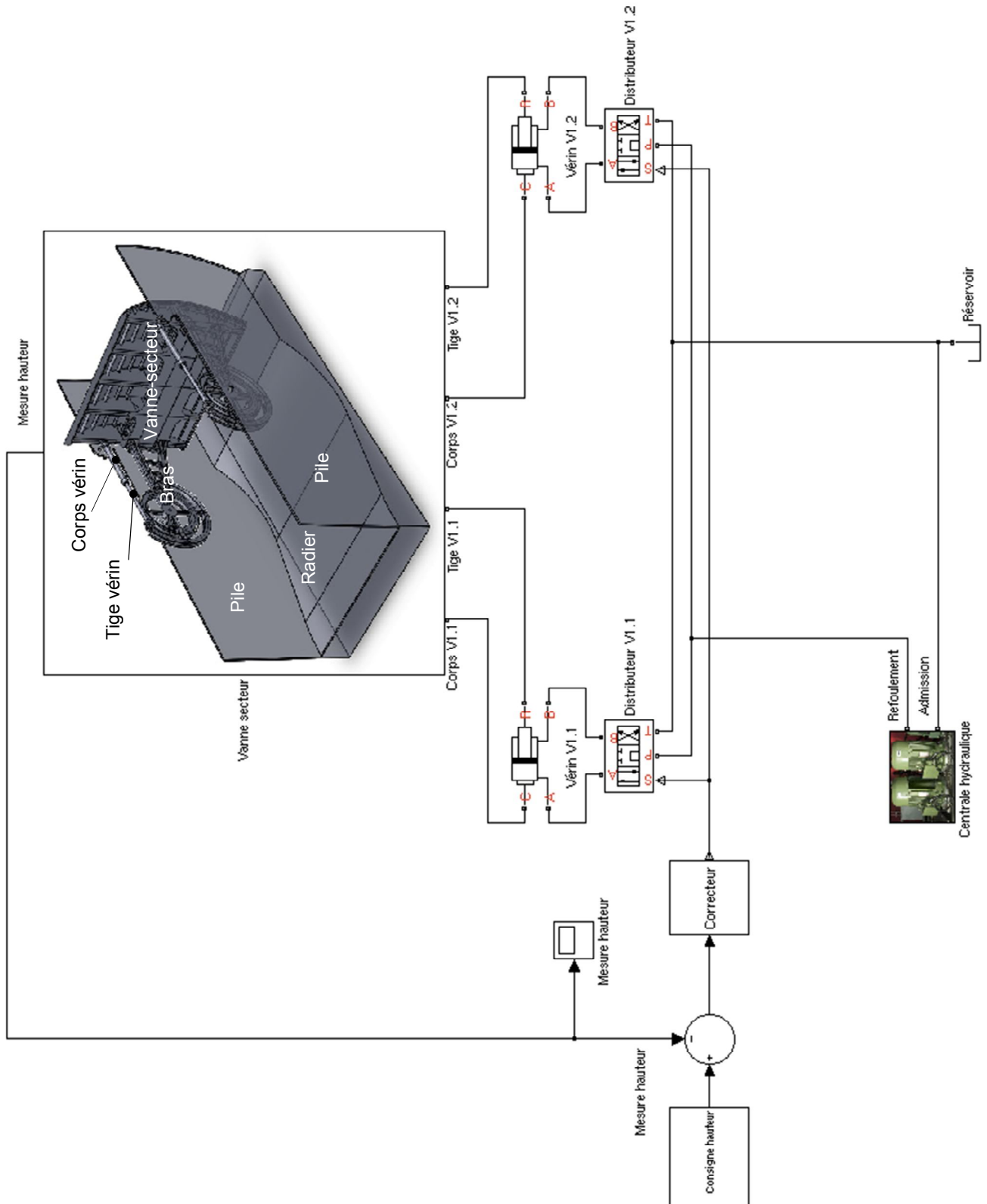
Figure 10 : photographies Lidar de la zone du Mont-Saint-Michel à environ trois années d'intervalle

Q17. **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.

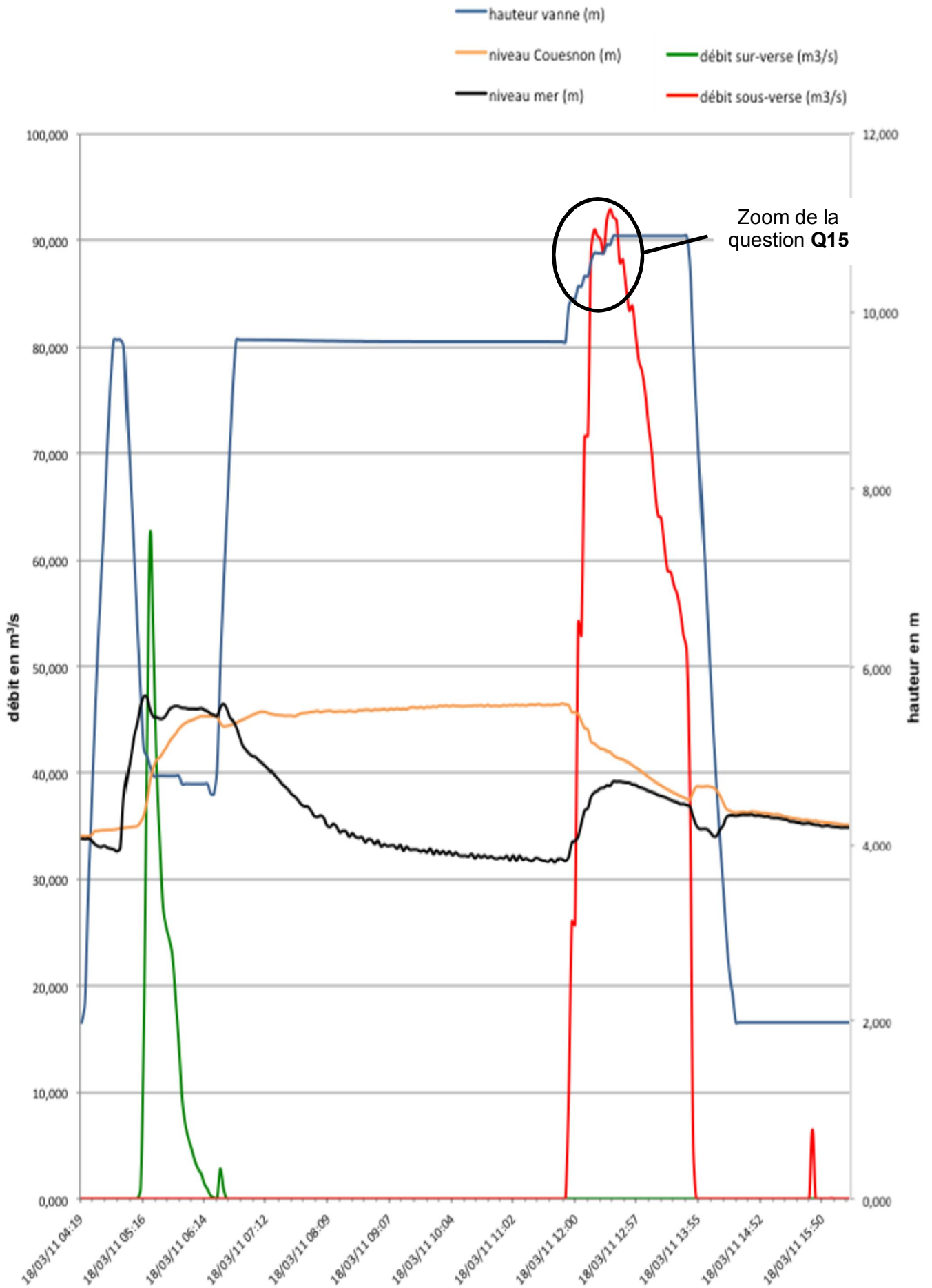
⁸ Appelée également LIDAR, il s'agit d'une technique de mesure optique basée sur l'analyse des propriétés d'une lumière laser renvoyée.

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 : état du barrage le 18 mars 2011

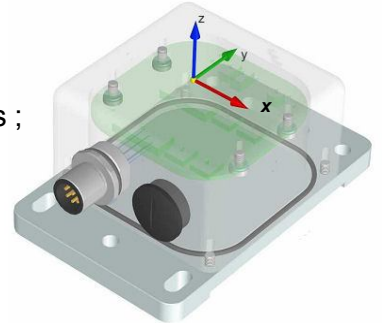


Document technique DT3 : caractéristiques de l'inclinomètre NBN 65-S0/90/90 C3

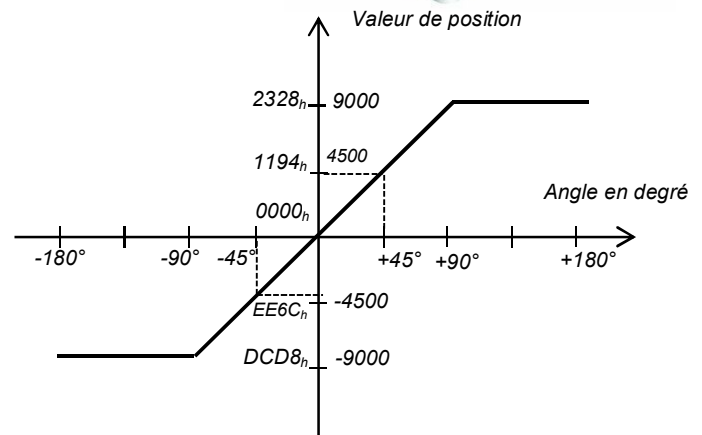
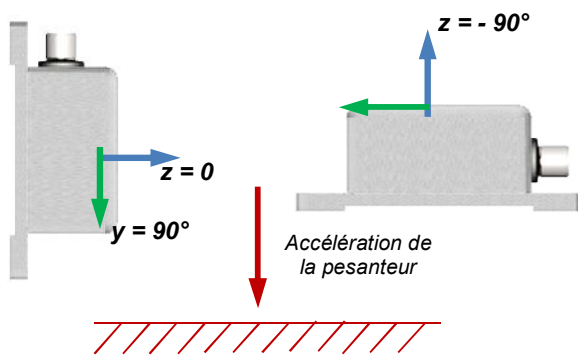
Ce composant permet la saisie de l'inclinaison dans le champ de gravitation terrestre grâce à des accéléromètres MEMS. La transmission des données peut s'effectuer par une interface CANOpen ou par un signal analogique.

Caractéristiques

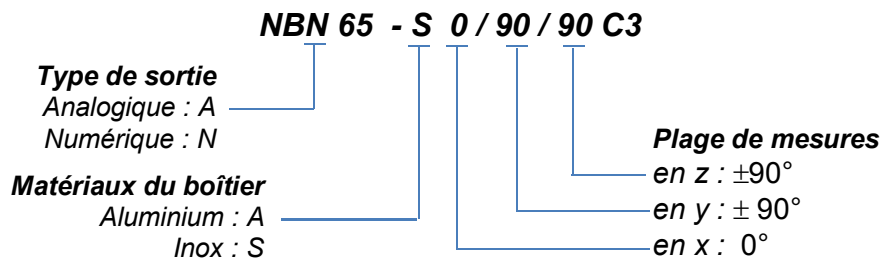
- plage de mesure : $\pm 90^\circ$;
- format des données numérique (bus CAN): binaire signé sur 16 bits ;
- pas de résolution : $0,01^\circ$;
- temps de réponse maximal : 1,1 s.



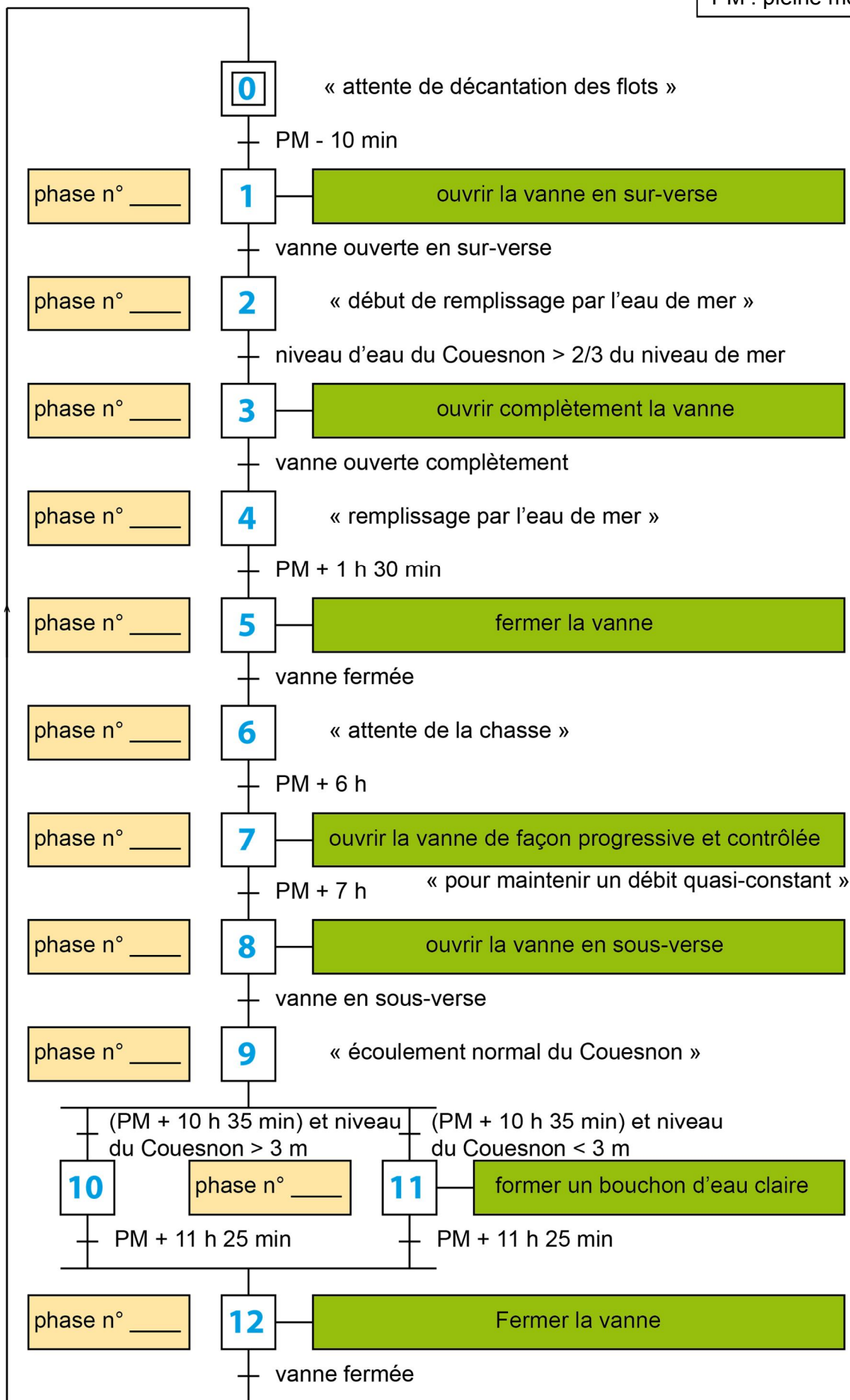
Fonctionnement, courbe caractéristique pour un pas de $0,01^\circ$

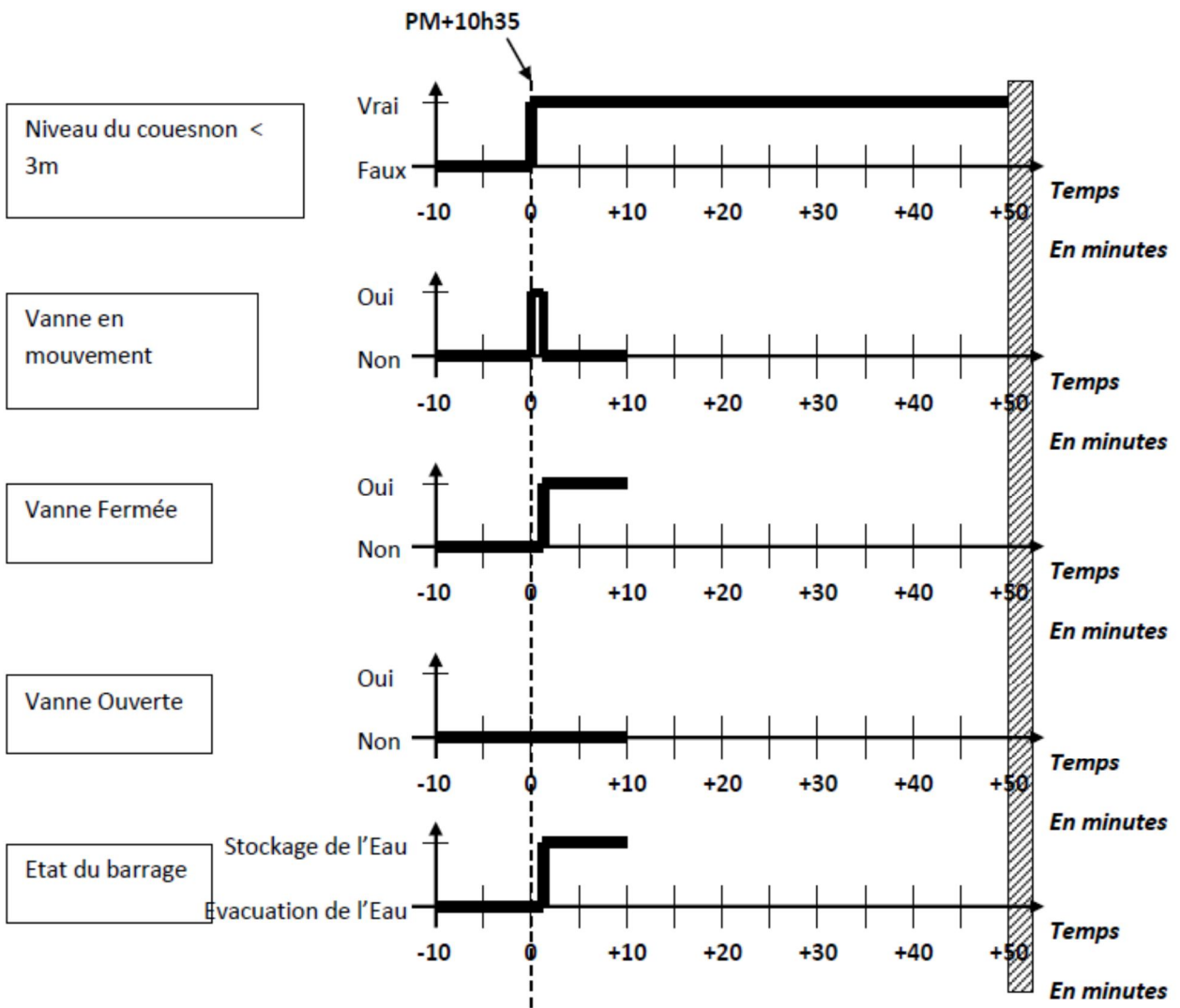


Référencement



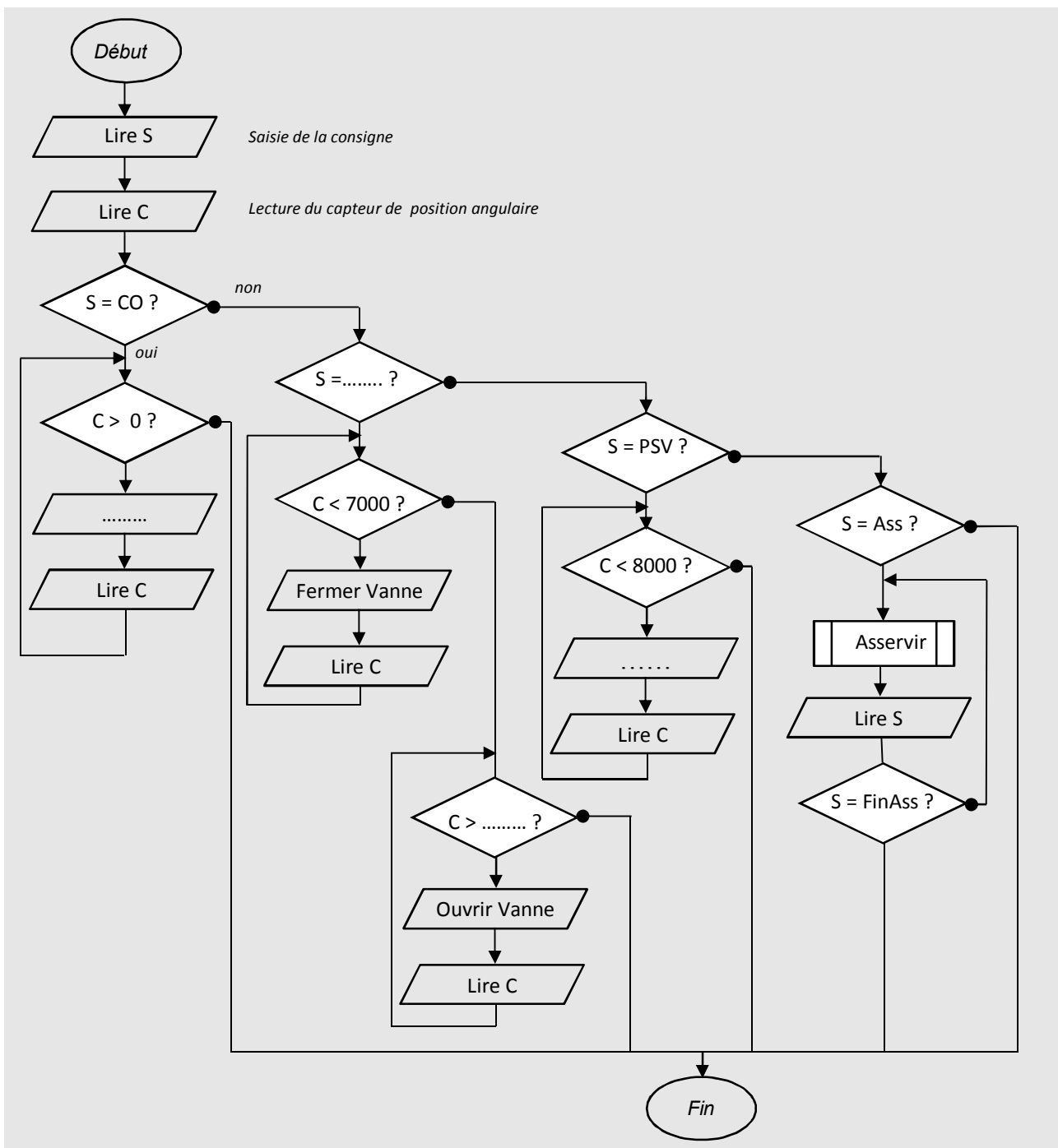
PM : pleine mer

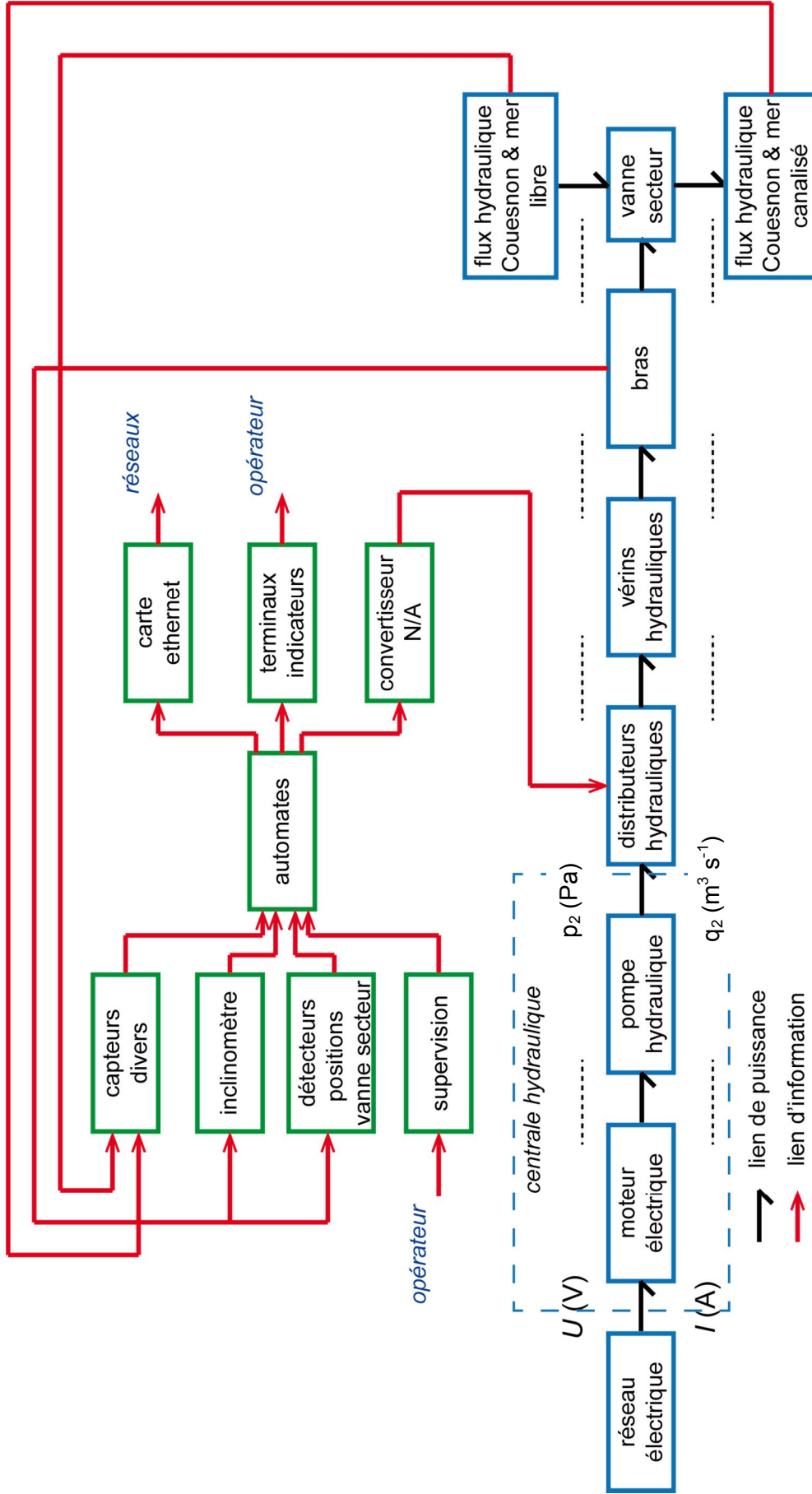




Document réponse DR3

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	





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