

SESSION 2014

---

**CAPET  
CONCOURS EXTERNE  
ET CAFEP**

**Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR**  
**Option : ARCHITECTURE ET CONSTRUCTION**  
**Option : ÉNERGIE**  
**Option : INFORMATION ET NUMÉRIQUE**  
**Option : INGÉNIERIE MÉCANIQUE**

**ANALYSE D'UN SYSTÈME PLURITECHNIQUE**

Durée : 4 heures

---

*Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.*

*L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.*

*Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.*

*De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.*

**NB : La copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.**

**Tournez la page S.V.P.**

# Sujet Analyse d'un système pluritechnique

Documents remis

Sujet

pages 2 à 29

Documents techniques

pages 31 à 38

Document réponse

page 40

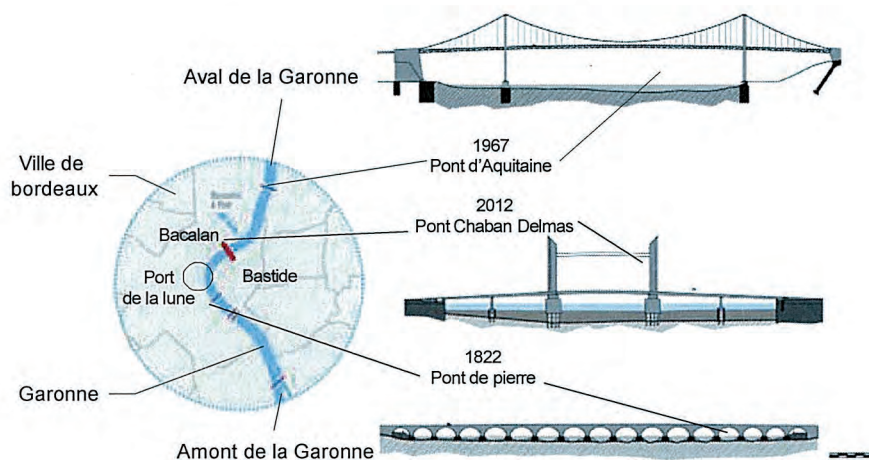
# Le pont Chaban-Delmas



*Pont Chaban-Delmas*

Le pont Jacques Chaban-Delmas de Bordeaux relie les quartiers de Bastide et de Bacalan en enjambant la Garonne à 2 km en aval du centre-ville. Il se situe entre le pont d'Aquitaine et le pont de Pierre. Le comité d'urbanisation de Bordeaux a choisi un pont levant afin de maintenir l'activité du port de la Lune situé en amont du pont d'Aquitaine tout en intégrant le projet technique et architectural dans l'environnement, le paysage et le patrimoine urbain.

## 1. Présentation générale



*Figure 1-1 : position des ponts sur la Garonne*

Grâce à son emplacement (figure 1-1), il permet également de boucler les boulevards urbains de Bordeaux. Il évite aux automobilistes de parcourir 29 millions de kilomètres par an soit un gain de temps d'environ 5 millions d'heures de transport. Le comité d'urbanisation de Bordeaux (cub) prévoit un trafic journalier de 28 000 véhicules par jour.

L'ouvrage est dimensionné et conçu pour la traversée simultanée de véhicules légers et poids lourds en desserte locale sur 2 x 2 voies, de transports en commun en site propre sur 2 x 1 voie, de deux roues sur pistes cyclables et de passants sur chemins piétonniers. Le pont constitue l'interconnexion des réseaux de transport en commun

(bus, tram ou tram-train) entre les rives. Les circulations piétonnes et cyclables sont effectuées à l'extérieur des quatre pylônes principaux par de larges passerelles courbes séparées de la chaussée routière (voir figure 1-2).

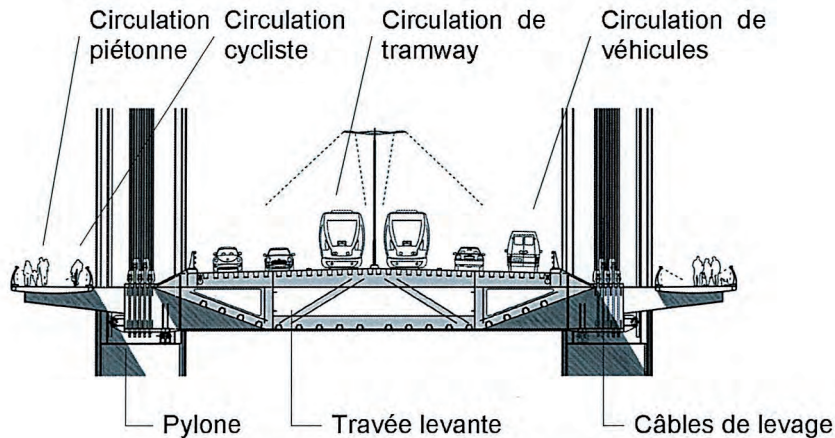


Figure 1-2 : répartition des usagers

Le pont à travée levante permet de laisser passer les plus gros bateaux (de croisière et autres bateaux d'exception) environ soixante fois par an. Il immobilise la circulation pendant deux heures environ. La mise en service de l'ouvrage a été réalisée en mars 2013.

À cause de ses dimensions, le pont est une vitrine technologique pour la ville de Bordeaux :

- largeur 45 m avec 17 m de largeur utile ;
- longueur 433 m ;
- travée levante centrale de 117 m de long ;
- 4 pylônes hauts de 80 m ;
- passe maritime navigable de 106 m de large et 53 m de haut.

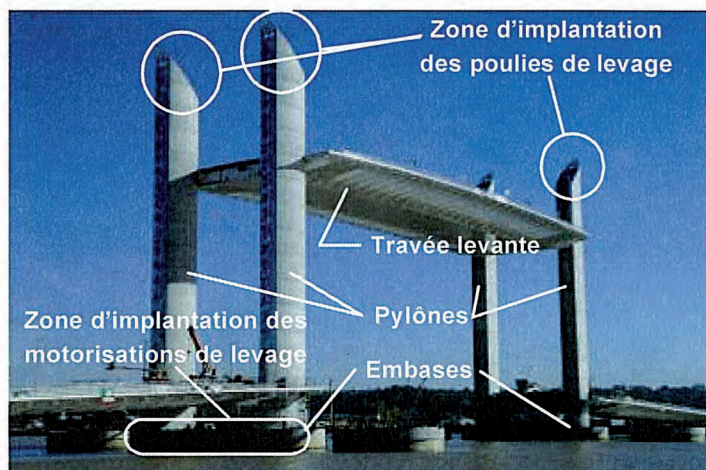


Figure 1-3 : éléments caractéristiques du pont

Lors de la conception du pont, le bureau d'études EGIS a pris en compte de nombreux facteurs en particulier météorologiques, vibratoires et technologiques.

Après l'introduction présentant le besoin de cet ouvrage d'art, l'étude se concentre sur la problématique liée à l'usage de la travée mobile. On s'attache à étudier les systèmes de mise en mouvement de la travée mobile, le comportement dynamique

lors des manœuvres, les systèmes d'informations permettant son pilotage et l'influence des utilisateurs sur la résistance de la travée.

## 2. Contexte d'utilisation du pont Chaban-Delmas

### 2.1. Présentation du service attendu

La traversée de la Garonne par le pont Chaban-Delmas permet de diminuer le nombre de kilomètres parcourus par les automobilistes. Le service attendu par l'agglomération de la ville de Bordeaux peut être représenté graphiquement en SysML avec le diagramme des cas d'utilisation (figure 2-1).

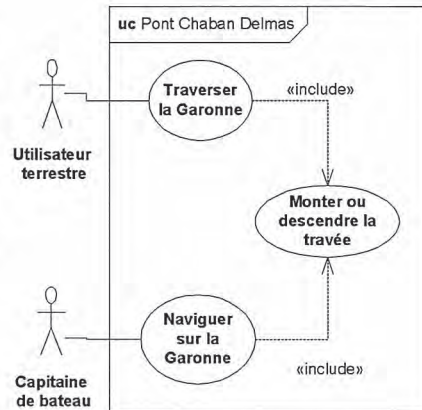


Figure 2-1 : diagramme des cas d'utilisation

### 2.2. Impact du pont levant sur la circulation

*Objectif : déterminer la durée d'interruption du trafic et son incidence sur le trafic automobile.*

La séquence de levée du pont est décrite en langage SysML dans le document technique DT1.

Le conducteur du pont apprécie, en fonction des conditions météorologiques, la possibilité de lancer la procédure de déplacement du pont.

**Question 1 : déterminer** la durée d'interruption du trafic des transports lors de la procédure de montée.

La manœuvre de descente s'effectue à la demande de la capitainerie. Le descriptif proposé est réalisé en fonctionnement normal. La procédure de descente diffère de la procédure de montée.

Le conducteur du pont met en œuvre la procédure de descente de la travée à la date  $H_d$ .

Un message annonce la descente imminente de la travée et le déclenchement de la procédure suivante :

- à  $H_d$ , les ascenseurs sont verrouillés et les moteurs sont alimentés ;
- la durée de la descente de la travée est de 11 minutes. En position basse celle-ci est verrouillée. Les ascenseurs sont déverrouillés et les enrouleurs (moteurs) sont désactivés ;
- la durée d'ouverture des barrières intérieures est de 5 minutes ;

- la durée d'ouverture des barrières extérieures est de 5 minutes et 30 secondes ;
- la durée du désarmement du pont est de 10 minutes.

**Question 2 :** déterminer la durée de la procédure de descente du pont et de réouverture à la circulation.

**Question 3 :** déduire les durées d'interruption minimale et maximale de la circulation en considérant que le bateau met de 5 à 10 minutes pour franchir le pont.

Le cahier des charges impose une durée totale de fermeture au trafic d'un maximum de 2h30.

**Question 4 :** vérifier le respect des conditions imposées par le cahier des charges.

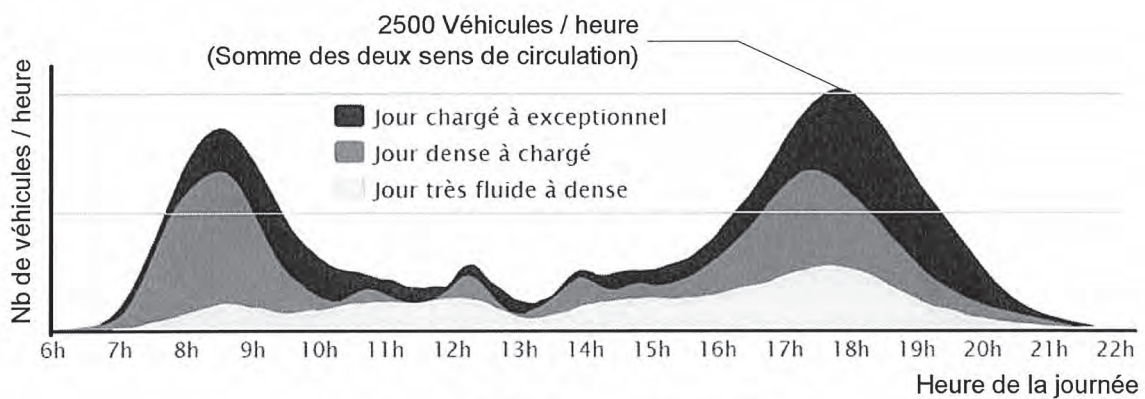


Figure 2-2 : trafic routier journalier

**Question 5 :** en analysant la figure 2-2, donner les plages horaires préférentielles pour le passage des bateaux afin de limiter la perturbation du trafic routier.

### 3. Présentation technique des éléments du pont

La figure 3-1 présente la vue d'ensemble du pont avec les 4 blocs de protection des embases. Les quatre pylônes sont répartis symétriquement par rapport à l'axe transversal et longitudinal du pont. Dans chaque embase se trouve un mécanisme de manœuvre du pont comme indiqué sur la figure 3-2.

#### Architecture des mécanismes

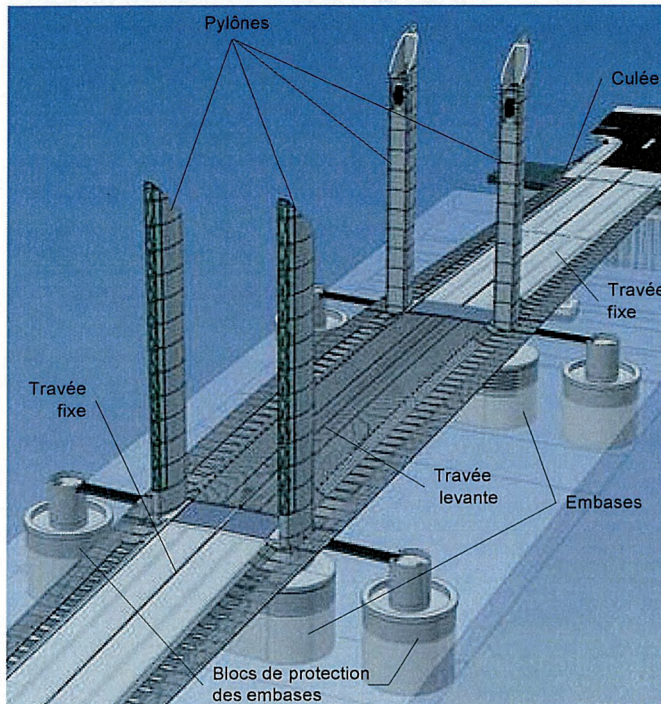


Figure 3-1 : vue d'ensemble du pont

La montée et la descente de la travée sont assurées par deux mécanismes de manœuvre (un mécanisme sur chaque embase). Un mécanisme de manœuvre est composé d'un moteur, d'un réducteur primaire, des deux réducteurs secondaires, de deux tambours d'entraînement, de deux contrepoids, de quatre poulies secondaires et de deux poulies principales (voir figure 3-2).

Un système de poulies – contrepoids transforme le mouvement de rotation des tambours d'entraînement en un déplacement linéaire de la travée.

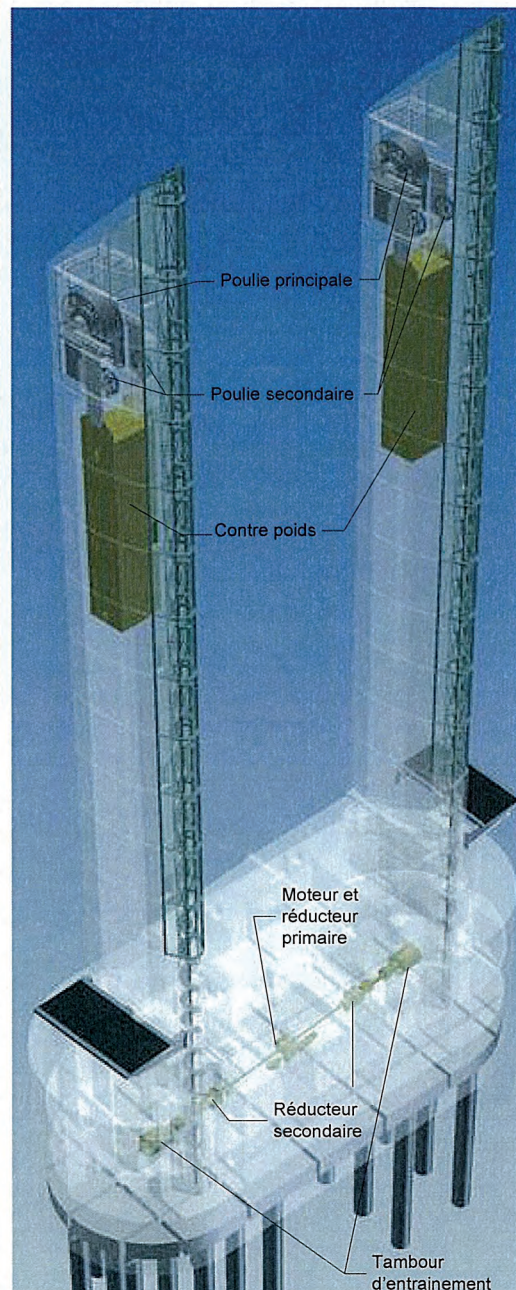


Figure 3-2 : mécanisme de manœuvre du pont

### Les poulies principales en tête des pylônes

Quatre poulies permettent de soulever la travée levante de 47,1 mètres (figure 3-3). Une poulie manœuvre 10 brins en même temps reliant le contrepoids à la travée levante. Le diamètre des poulies principales est de 4 m.



Figure 3-3 : poulie principale

### Les poulies secondaires

Quatre poulies secondaires servent aux déplacements des contrepoids (figure 3-4). Dans chaque pylône, une poulie manœuvre le brin reliant le contrepoids au tambour d'entraînement. Le diamètre des poulies secondaires est de 1,7 m.

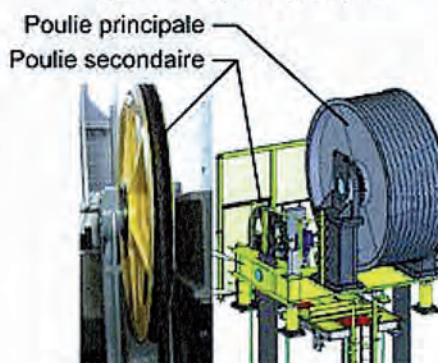


Figure 3-4 : poulie secondaire

### Les tambours d'entraînement

Ils sont au nombre de 4, un dans chaque pylône (figure 3-5). Leur diamètre est de 1,68 m. Ils enroulent les câbles de manœuvre provenant directement des poulies secondaires et des contrepoids.



Figure 3-5 : tambours d'entraînement

### Les contrepoids

Ils sont au nombre de 4, un dans chaque pylône (figure 3-6). La masse totale des contrepoids est au minimum inférieure de 50 tonnes à la masse de la travée levante. Ils permettent à celle-ci de rester immobile lorsque la travée repose sur ses appuis en position basse.

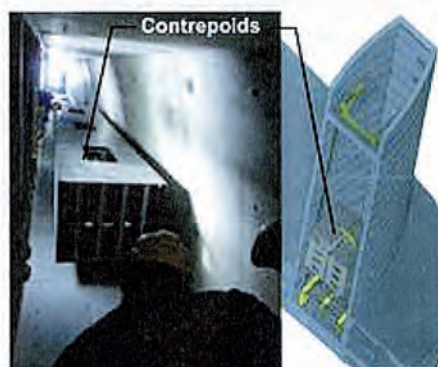


Figure 3-6 : contrepoids



### **Système de guidage de la travée**

Le guidage de la travée est réalisé par deux guidages longitudinaux et deux guidages transversaux (figure 3-7). Le guidage longitudinal est obtenu par des galets roulants sur les ailes des rails de guidage. Le guidage transversal est obtenu par des galets roulant sur l'âme des rails.



Figure 3-7 : guidage transversal

## **4. Système d'entraînement et de manœuvre du pont**

*Objectif : choisir un moteur et un variateur répondant aux contraintes du cahier des charges pour la levée de la travée.*

### **4.1. Système d'entraînement du pont**

*Objectif : déterminer la meilleure configuration pour le système d'entraînement de la travée à partir du pré-dimensionnement des principaux composants du système de levage.*

Le premier critère de choix pour le constructeur est de minimiser la prépondérance. La prépondérance est définie par la différence entre la masse de la travée et celle des quatre contrepoids. Plus la prépondérance est faible plus la puissance du moteur nécessaire au déplacement de la travée est faible.

Le second critère de choix est la vitesse de levée du tablier qui dépend en partie de la solution constructive adoptée.

**Question 6 : exprimer** les hypothèses permettant de réduire l'étude de quatre sous-systèmes de levage identiques de la travée levante à un seul.

Pour l'étude du système d'entraînement de la travée, figure 4-1 et figure 4-2, on considère que :

- les quatre pylônes sont modélisés par un pylône équivalent (pylône 8) ;
- la travée est modélisée par une masse (travée 1) ;
- les quatre contrepoids sont modélisés par un contrepoids équivalent (contrepoids 2) ;
- les quatre systèmes de levage (poulies, câbles) sont modélisés par un système de levage équivalent.

Dans cette étude, deux configurations sont abordées.

**Solution n° 1 :** la manœuvre de la travée (1) est réalisée par un système à brin unique et à double entraînement (figure 4-1 et document technique DT2). Le brin unique est représenté par le câble de manœuvre (6).

Le câble de manœuvre est disposé de façon à :

- lever la travée en tirant le contrepoids par sa base et vers le bas ;
- abaisser la travée en tirant le contrepoids par son sommet et vers le haut.

Le câble de manœuvre forme une boucle fermée s'enroulant autour du tambour de manœuvre.

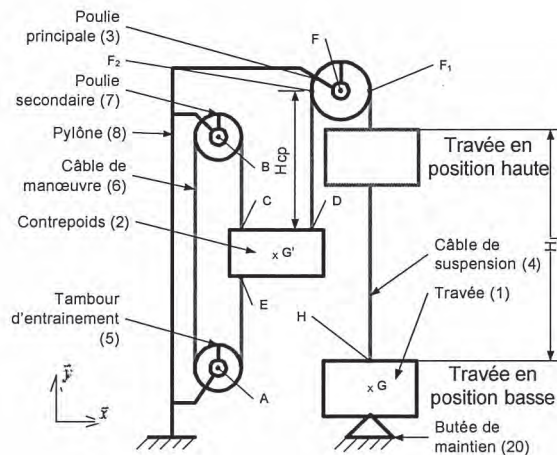


Figure 4-1 : solution n°1, système de levage à brin unique et à double entraînement, travée en position basse

**Solution n° 2 :** la manœuvre de la travée (1) est réalisée par un système à deux brins et à simple entraînement (figure 4-2 et document technique DT3). Ces brins sont représentés par le câble de manœuvre (6 bis).

Dans un système à simple entraînement, le câble de manœuvre est disposé de telle façon qu'il lève la travée en tirant le contrepoids par sa base et vers le bas. La descente de la travée s'effectue en relâchant le câble de manœuvre de façon contrôlée de sorte que le contrepoids retourne en position haute (travée en position basse).

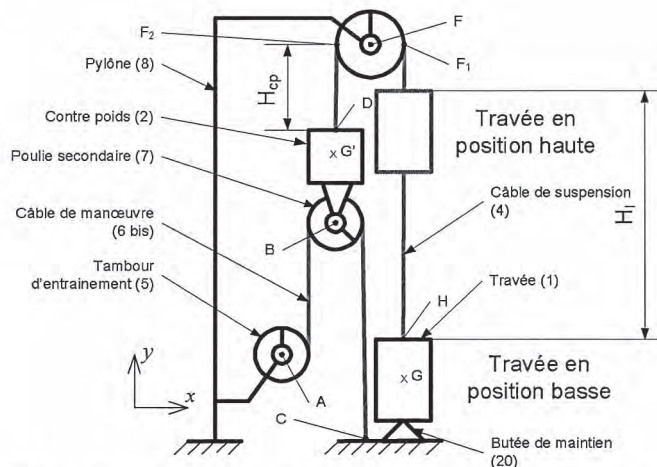


Figure 4-2 : solution n°2, système de levage à deux brins et simple entraînement, travée en position basse

## Étude de la solution n°2

Hypothèses de l'étude :

- le repère de calcul est considéré comme galiléen ;
- le câble de suspension (4) et le câble de manœuvre (6 bis) sont considérés comme des liens inextensibles.

Données pour les questions 7 à 15 :

système de levage à deux brins et simple entrainement - solution n°2 document technique DT3	
masse de la travée (1)	$M_t = 2\,850 \cdot 10^3 \text{ kg}$
hauteur maximum de levée de la travée (1)	$H_l = 47,166 \text{ m}$
longueur totale du câble de suspension (4) de H à D	$L_c = 71,71 \text{ m}$
masse linéique d'un brin du câble de suspension (4)	$\mu_c = 28,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$
diamètres primitifs des poulies principales (3)	$D_p = 4 \text{ m}$
nombre de brins du câble de suspension (4) du système de levage équivalent	$N_s = 40$
hauteur du contrepoids (2) (travée en position basse)	$H_{cp} = 8,996 \text{ m}$
masse du contrepoids (2) (contrepoids équivalent)	$M_{cp}$
accélération de pesanteur avec $g = -g \cdot y$	$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

La masse du câble de manœuvre (6 bis) est négligée devant celle du câble de suspension (4).

Cahier des charges pour le choix de la prépondérance du système de levage à deux brins et simple entrainement (solution n°2) :

- la travée est équilibrée de sorte que le vent ascendant dans la position haute ne provoque pas de mou dans les câbles ;
- la prépondérance a été déterminée en prenant en compte un vent maximal accidentel ascendant  $F_{vasc}$  de 795 kN appliqué au centre de gravité G de la travée (1) avec  $\vec{F}_{vasc \rightarrow 1} = 795 \cdot 10^3 \cdot y$  (en N) ;
- la position d'équilibre statique de l'ensemble {contrepoids (2), câble de suspension (4), travée (1), poulie principale (3)}, travée en position haute et sans action du moteur, constitue le minimum de la prépondérance pour la solution n°2.

**Question 7 :** à partir des données fournies, **calculer**,

- la masse  $M_{cm}$  de câble de suspension (4) déplacée (longueur  $H_l$ ) entre les positions basse et haute de la travée ;
- la masse  $M_{ccp}$  du câble de suspension (4) entre les points D et  $F_2$  lorsque la travée est en position basse ;

- la masse  $M_{ct}$  du câble de suspension (4) entre les points H et  $F_1$  lorsque la travée est en position haute.

**Question 8 :** en isolant l'ensemble {contrepois (2), câble de suspension (4), travée (1), poulie principale (3)}, **calculer** la masse du contrepois (2) pour respecter les conditions du cahier des charges dans le cas du système de levage à deux brins et simple entraînement (solution n°2). **En déduire** la prépondérance pour ce système de levage.

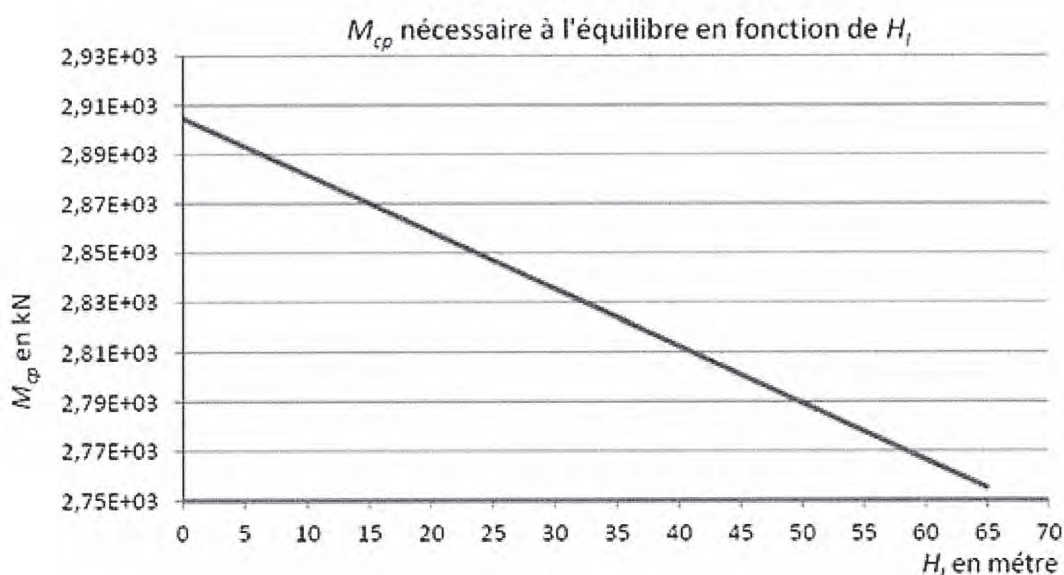
### Étude de la solution n°1

Cahier des charges pour le choix de la prépondérance du système à double entraînement et brin unique (solution n°1, document technique DT2) :

- l'ensemble contrepois, câble de suspension et travée doit être équilibré sans action du moteur lorsque la travée est en position haute afin que la travée ne subisse plus de soulèvement en position haute ;
- l'effet du vent maximum accidentel ascendant  $F_{vasc}$  est compensé, si nécessaire, par l'action du moteur sur le contrepois.  $F_{vasc}$  n'est pas pris en compte dans cette étude.

**Question 9 :** **expliquer** en quoi, dans cette configuration, l'action du moteur sur le contrepois, par l'intermédiaire du câble de manœuvre (6), permet de compenser les actions du vent, ce qui justifie que  $F_{vasc}$  ne soit pas pris en compte dans cette étude.

Pour le système de levage à double entraînement et à brin unique (solution n°1), la masse du contrepois (2) est  $M_{cp} = 2783,63 \cdot 10^3$  kg.



Graphique 4-3 :  $M_{cp}$  en fonction de  $H_1$  à l'équilibre