

SESSION 2010

CAPLP
CONCOURS EXTERNE
ET CAFEP

Section : GÉNIE ÉLECTRIQUE
Option : ÉLECTROTECHNIQUE ET ÉNERGIE

SCIENCES ET TECHNIQUES INDUSTRIELLES

Durée : 6 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 : Hormis l'en-tête détachable, 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.

A

RENOVATION D'UN PONT LEVANT

Composition du sujet : le sujet comporte trois dossiers

Dossier de présentation

Présentation du système : 3 pages numérotées de 1/4 à 4/4
Scénario du sujet : 1 page 1/1

Dossier travail demandé :

L'épreuve comporte 5 parties indépendantes :

- Partie A :** Dimensionnement du moteur de levée principal (pages A1/3 à A3/3).
- Partie B :** Etude de la motorisation de la levée du pont (pages B1/4 à B4/4).
- Partie C :** Perturbations harmoniques sur le réseau (pages C1/6 à C6/6)
- Partie D :** Compatibilité électromagnétique (pages D1/4 à D4/4)
- Partie E :** Communication et supervision (pages E1/6 à E6/6)

Dossier technique :

15 pages DT1 à DT15

Conseils aux candidats :

Les différentes parties du sujet sont indépendantes. De nombreuses questions sont elles mêmes indépendantes. Une lecture attentive de l'ensemble s'avère nécessaire avant de composer.

Il sera tenu compte de la cohérence avec laquelle les candidats traiteront chaque partie, le jury préférant une réflexion d'ensemble de la partie abordée à un éparpillement des réponses.

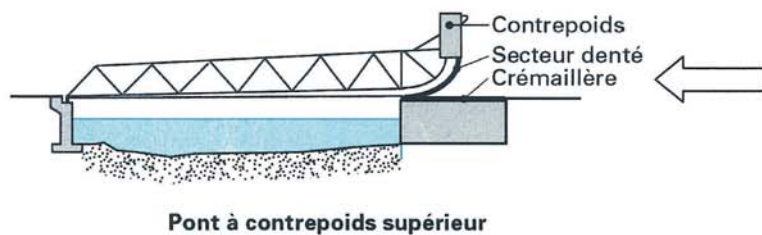
Il est demandé de présenter clairement les calculs, de dégager et d'encadrer les résultats relatifs à chaque question, d'utiliser les notations du sujet. La qualité des réponses (utilisation d'une forme adaptée pour présenter le résultat, justification du résultat, expression écrite...) sera prise en compte dans l'évaluation.

PONT LEVANT À CRÉMAILLÈRE DU PORT MARITIME DE DUNKERQUE



Le pont levant du port de Dunkerque a été construit en 1934 et 1935. Il a été réhabilité une première fois entre 1960 et 1963, une seconde fois en 1973. C'est un ouvrage de type «SCHERZER», dit « à contreponds supérieur ». Sa portée est de 45 mètres. Il comprend une chaussée de 7 mètres de large et des trottoirs de chaque côté.

Principe de fonctionnement des ponts levants de type SCHERZER :



Le mouvement de bascule se fait par roulement d'un secteur denté circulaire sur une crémaillère fixée au sol.

L'ouvrage recule en même temps qu'il pivote.



Figure 1

Le déplacement de l'ouvrage est obtenu par engrènement des pignons de sortie de l'ensemble motoréducteur, sur des crémaillères horizontales solidaires de la charpente (figure 1 et figure 3)

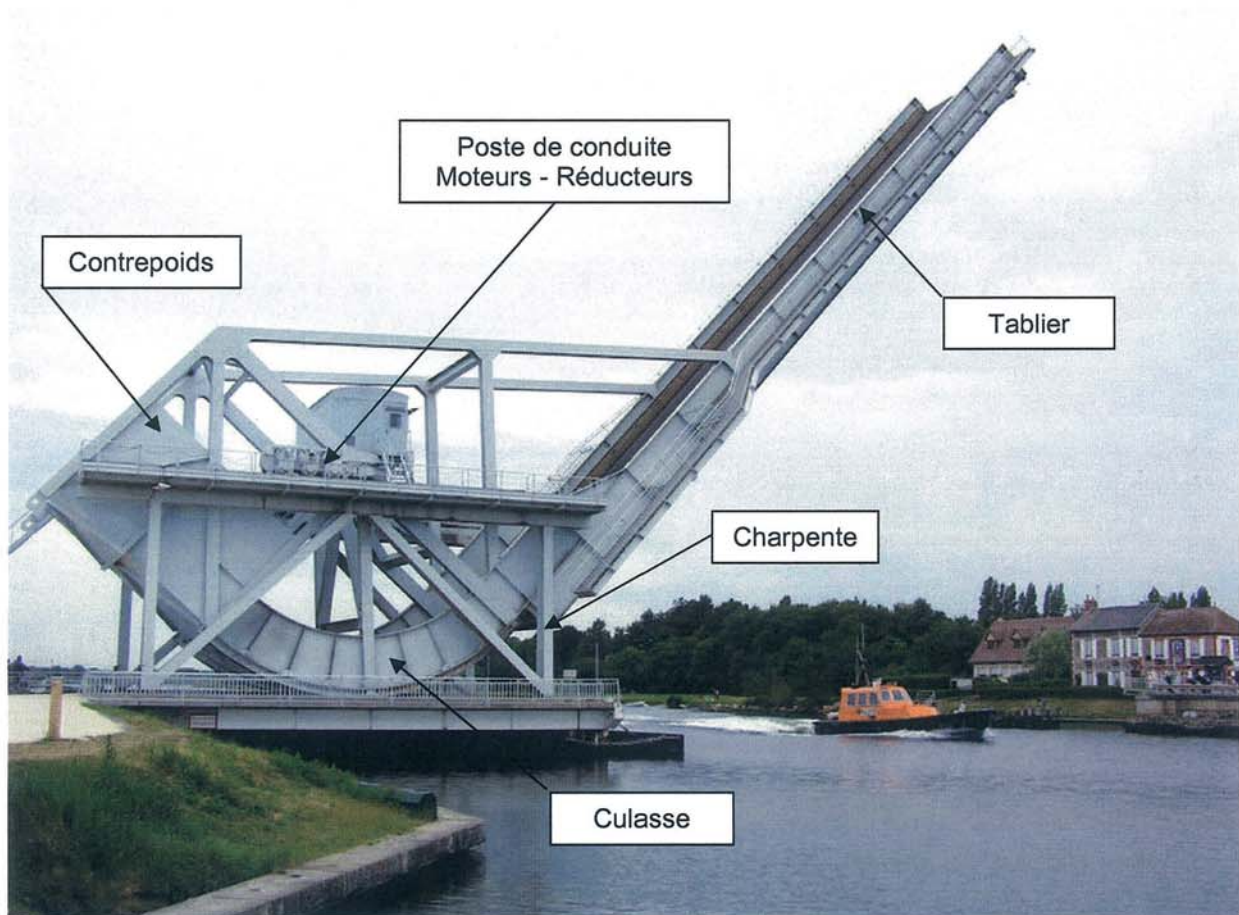


Figure 2

La chasse au poids est l'un des soucis permanents du concepteur de pont mobile. Tout gain de poids a un effet bénéfique évident sur la valeur du contrepoids, la dimension des mécanismes, la puissance motrice et les fondations.

Le contrepoids a sa masse fixée par l'équilibre statique. Pour réduire son impact sur le volume des « caisses à lest », on met en œuvre des lests à haute densité.

Le vent est un facteur déterminant dans l'étude de la stabilité du pont et la détermination de la puissance utile lors des manœuvres de basculement.

Les dispositifs de verrouillage sont nombreux : des verrous de blocage du tablier pour les positions « en service » et « fermée » stabilisent l'ouvrage respectivement sous les effets de surcharges et de vent.

Caractéristiques techniques du pont de Dunkerque (extraits) :

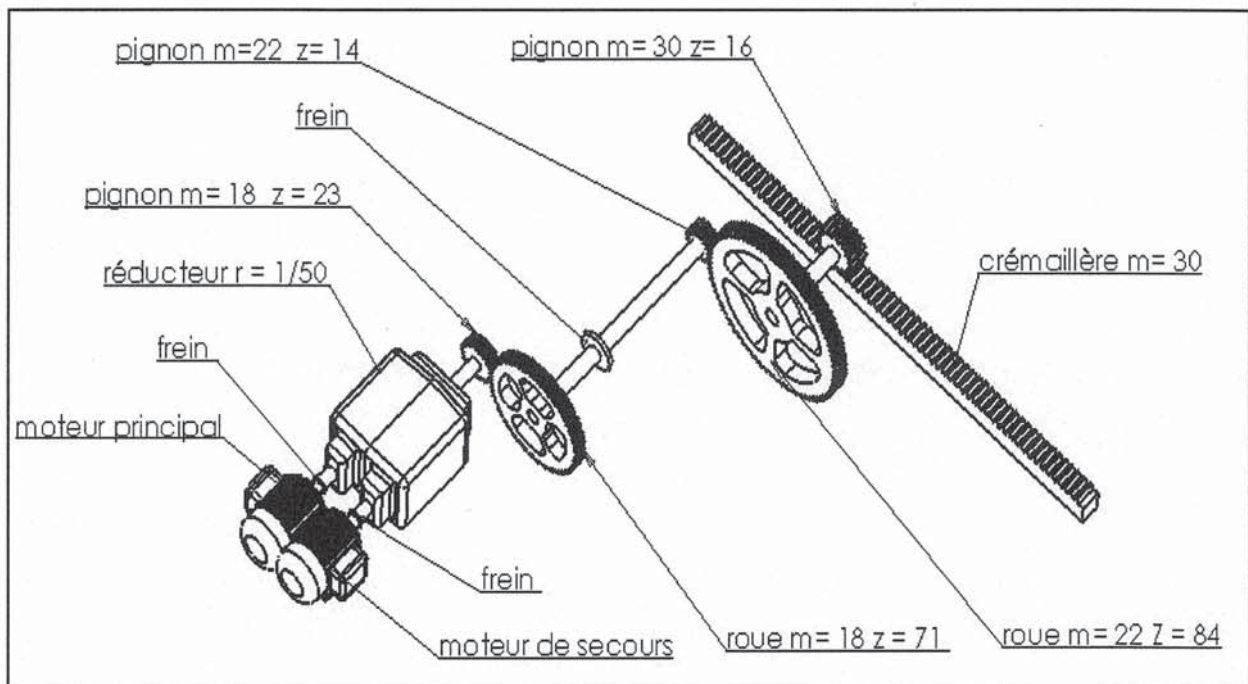
- | | |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| ▪ Largeur totale : | 10,896 m |
| ▪ Largeur de chaussée : | 7 m |
| ▪ Largeur des trottoirs : | 2 x 1,20 m |
| ▪ Largeur entre axe de roulement : | 8,2 m |
| ▪ Rayon de roulement du secteur denté circulaire : | 8 m |
| ▪ Hauteur totale du pont en position relevée (par rapport à la chaussée) : | 53 m |
| ▪ Angle de relevage maximum de la travée : | 85° |
| ▪ masse du tablier : | 190 T |
| ▪ Masse de la culasse : | 62 T |

MECANISME DE BASCULEMENT :

- Le basculement de l'ensemble mobile est assuré par un motoréducteur de puissance 132 kW à 1500 tr.min⁻¹
- En cas de défaillance du moteur principal, un moteur de secours (Puissance 15 kW à 1500 tr.min⁻¹) assure la manœuvre du pont.
- Un dispositif d'accouplement débrayable permet d'assurer manuellement la commutation entre le moteur principal et le moteur de secours.
- Chaque moteur est équipé de son propre dispositif de freinage (frein de service)
- Deux freins de secours agissent directement sur les arbres de transmission, entre le réducteur et les crémaillères d'entraînement.

SCHEMA DE LA TRANSMISSION DE PUISSANCE (pour une crémaillère horizontale)

Figure 3



Extrait du cahier des clauses techniques particulières (CCTP) :

PERFORMANCES :

- Temps de manœuvre : 120 s au total
 - 7s pour l'accélération,
 - 106 s pour le régime établi,
 - 7 s pour la décélération.
- Nombre de cycle : 4000 par an (ouverture et fermeture)
- Durée de vie : 30 ans
- Freinage mécanique : $t < 1,1$ s correspondant à débattement de 400 mm en bout de volée

LIMITES DE FONCTIONNEMENT :

Le pont doit être manœuvrable sous l'action d'un vent maximum de 100 km.h⁻¹

L'effort maximum agissant sur le mécanisme est variable suivant la force du vent et l'angle de positionnement de la volée. Cet effort est calculé suivant les prescriptions des règles « Neige et Vent 1965 » (NV65), édition 1997.

La sûreté de fonctionnement (verrouillage du pont) est assurée par l'intermédiaire de deux vérins électriques.

Les enjeux de la rénovation :

La vétusté du matériel entraînant des dysfonctionnements répétés, le trafic fluvial est de plus en plus fréquemment perturbé.

Les matériels sont anciens, les opérations de maintenance deviennent de plus en plus onéreuses et le département d'exploitation des ouvrages a décidé de moderniser le pont levant.

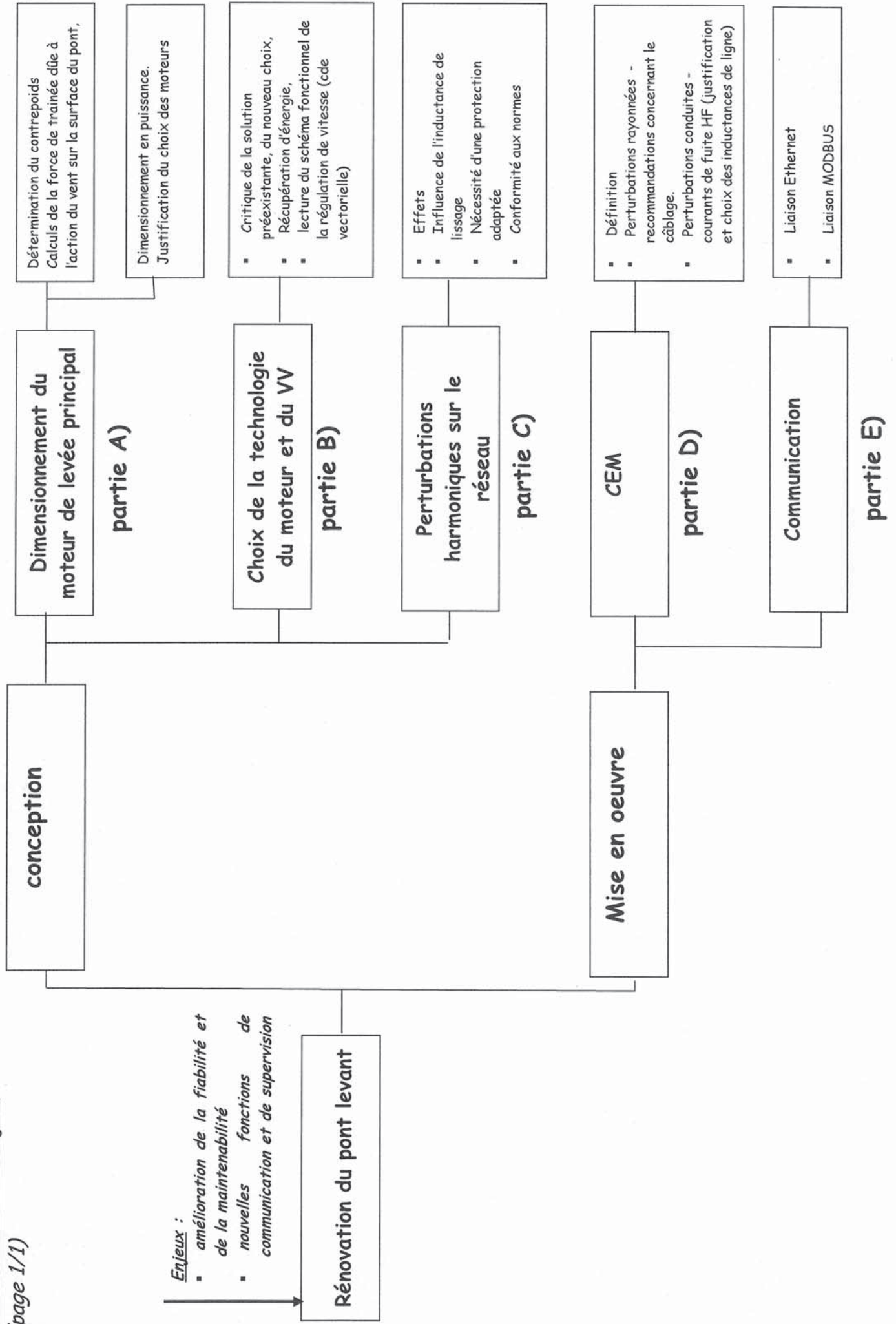
2 enjeux majeurs ont été fixés :

- L'amélioration de la sécurité, de la fiabilité du système et de la fluidité du trafic portuaire.
- La diminution du nombre d'opérations de maintenance et l'ajout de nouvelles fonctionnalités en communication et supervision.

Scénario du sujet :

(page 1/1)

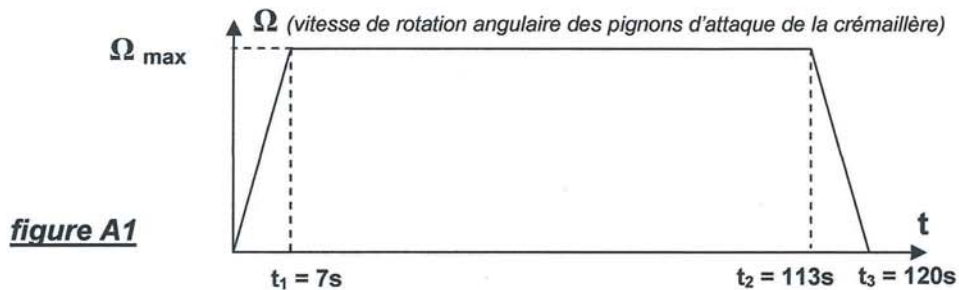
- Enjeux :**
- amélioration de la fiabilité et de la maintenabilité
 - nouvelles fonctions de communication et de supervision



Partie A : Dimensionnement de la motorisation

Rappel : Le cahier des clauses techniques particulières impose :

1. La manoeuvrabilité du pont sous l'action d'un vent de 100 km.h^{-1} .
2. Un temps de manoeuvre maximal (ouverture ou fermeture) fixé à 120 s au total, dont :
 - 7s pour l'accélération (mouvement uniformément accéléré)
 - 106 s pour le régime établi,
 - 7s pour la décélération (mouvement uniformément décéléré)



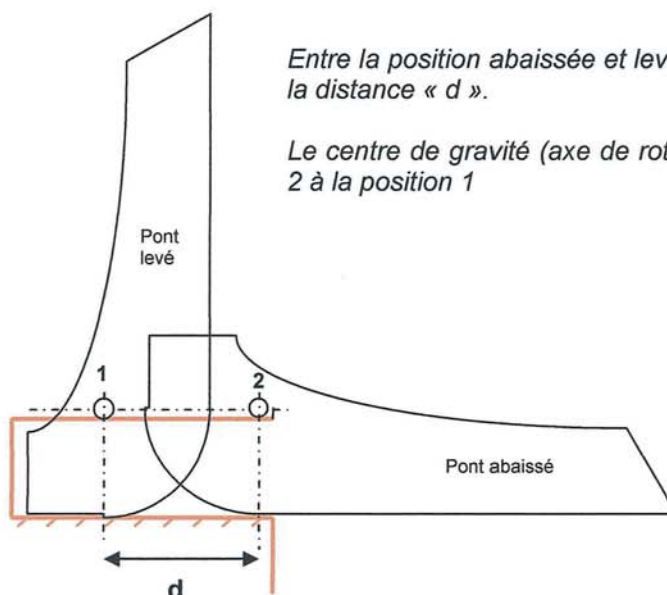
L'objectif de cette première partie sera, à partir de l'étude de la structure du pont, de l'action du vent et des caractéristiques de la chaîne cinématique :

- de déterminer la masse du contrepoids à installer sur la culasse.
- de calculer la force de traînée.
- de déterminer l'effort exercé sur les crémaillères fixées au sol.
- de justifier la puissance retenue pour le moteur principal et le moteur de secours

A.1. Détermination de la masse du contrepoids à installer sur la culasse :

Le principe de fonctionnement du pont levant SCHERZER repose sur l'équilibre exact des masses en mouvement. L'équilibre est obtenu à l'aide du contrepoids installé sur la culasse mobile du pont. Cette conception permet de réduire au plus juste la puissance du moteur d'entraînement.

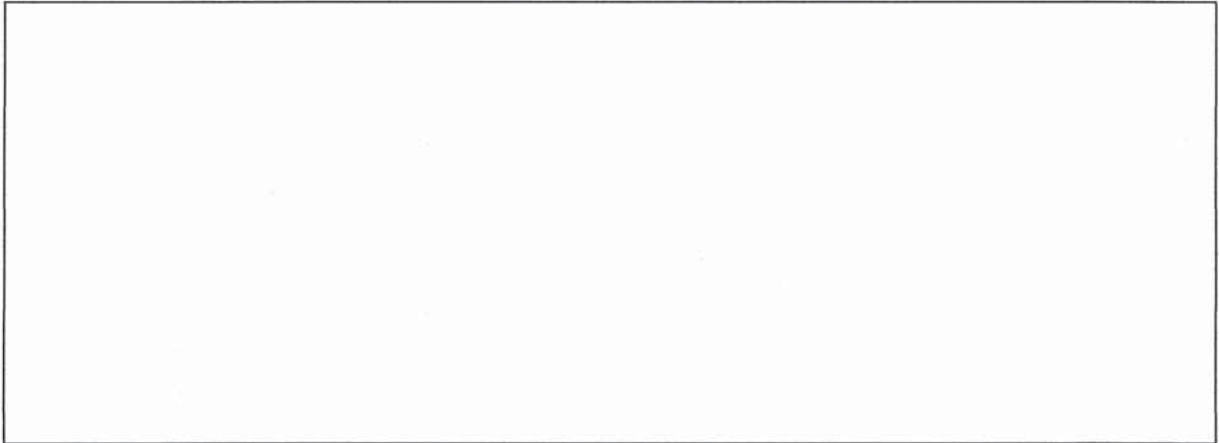
On admettra que durant toute la manoeuvre, le centre de gravité de la structure mobile reste exactement confondu avec son axe de rotation (voir ci-dessous)



Entre la position abaissée et levée, la structure mobile a reculé de la distance « d ».

Le centre de gravité (axe de rotation) s'est déplacé de la position 2 à la position 1

Estimer la masse du contrepoids permettant de réaliser la condition d'équilibre énoncée ci-dessus (les hypothèses géométriques nécessaires seront précisées par le candidat) .



A.1. Détermination de l'action du vent sur le pont (calcul de la force de trainée) :

L'action du vent sur le pont peut être définie comme étant la résultante des effets ponctuels produits lorsqu'il rencontre un obstacle. Ces effets dépendent étroitement de paramètres liés aux caractéristiques de l'air (masse volumique, pression atmosphérique, température, etc.), et de l'obstacle (forme, dimensions, état de surface, rugosité, etc.).

La connaissance de cette action et plus particulièrement de sa composante horizontale appelée « force de trainée », est prépondérante pour le dimensionnement de la motorisation.

La force de trainée, exprimée en Newton, est donnée par l'expression :

$$F_t = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot C_t$$

- ρ est la masse volumique de l'air en kg/m^3 , on prendra $\rho = 1,3 \text{ kg.m}^{-3}$
- S est la surface nette, c'est à dire la surface, en m^2 , de la projection de la surface considérée sur un plan perpendiculaire à la direction du vent.
- v est la vitesse du vent en m.s^{-1}
- C_t est le coefficient de trainée (coefficient aérodynamique spécifique à la surface), sans unité

Pour le calcul de la surface nette, on appliquera un coefficient global de 0,45 afin de tenir compte des caractéristiques spécifiques aux composants de la structure (chaussée en caillebotis, trottoirs en panneaux pleins, structure supérieure en treillis profilés, etc.)

Le C_t du pont étudié est estimé à 1,3.

- Calculer la surface nette.
- Calculer la force de trainée maximale (pour un vent de 100 km.h^{-1})



A.2. Justification de la puissance des moteurs :

La rotation de la travée mobile est limitée à 85° pour un rayon de roulement égal à 8 mètres. Le profil de vitesse est défini figure A1.

A.2.1. Calculer, avec la force de trainée maximale, le couple exercé sur chacune des crémaillères fixées au sol.

A.2.2. Déterminer la vitesse de rotation du secteur denté sur la crémaillère fixée au sol.

A.2.3. Déterminer le rapport de réduction global entre l'arbre de sortie moteur et la roue dentée.

A.2.4. Déduire des calculs précédents la puissance mécanique nécessaire à la manœuvre du pont dans les conditions les plus défavorables. On considérera que le rendement de l'ensemble de la chaîne réducteur-pignons-crémaillères est égal à 90 %

A.2.5. En déduire le coefficient de sécurité k_s appliqué par le constructeur au dimensionnement de la motorisation.

Le moteur de secours, utilisé par vent nul en cas de défaillance du moteur principal, a une puissance de 15 Kw.

A.2.6 Justifier la puissance de ce moteur. Argumenter votre réponse.

Partie B : Etude de la motorisation de la levée du pont:

B.1. Choix de la technologie moteur :

L'un des enjeux fixés pour cette rénovation est l'amélioration de la fiabilité du système ainsi que la diminution du nombre des opérations de maintenance.

Concernant le moteur principal de levée le choix s'est porté sur un moteur asynchrone triphasé de 132 kW, associé à un variateur de vitesse à commande vectorielle de flux avec capteur.

La solution retenue permet de répondre à l'enjeu fixé ?

Justifier votre réponse. Argumenter au regard des critères (liste non exhaustive) proposés ci-dessous.

- La robustesse,
- la maintenance,
- le refroidissement,
- les puissances massique et volumique,
- le coût du moteur,
- la complexité, le coût du variateur associé,
- la nécessité d'un capteur de position,
- les performances dynamiques,
- la précision,
- la maîtrise du couple à basse vitesse et à l'arrêt,
- la possibilité de récupération d'énergie,
- ...

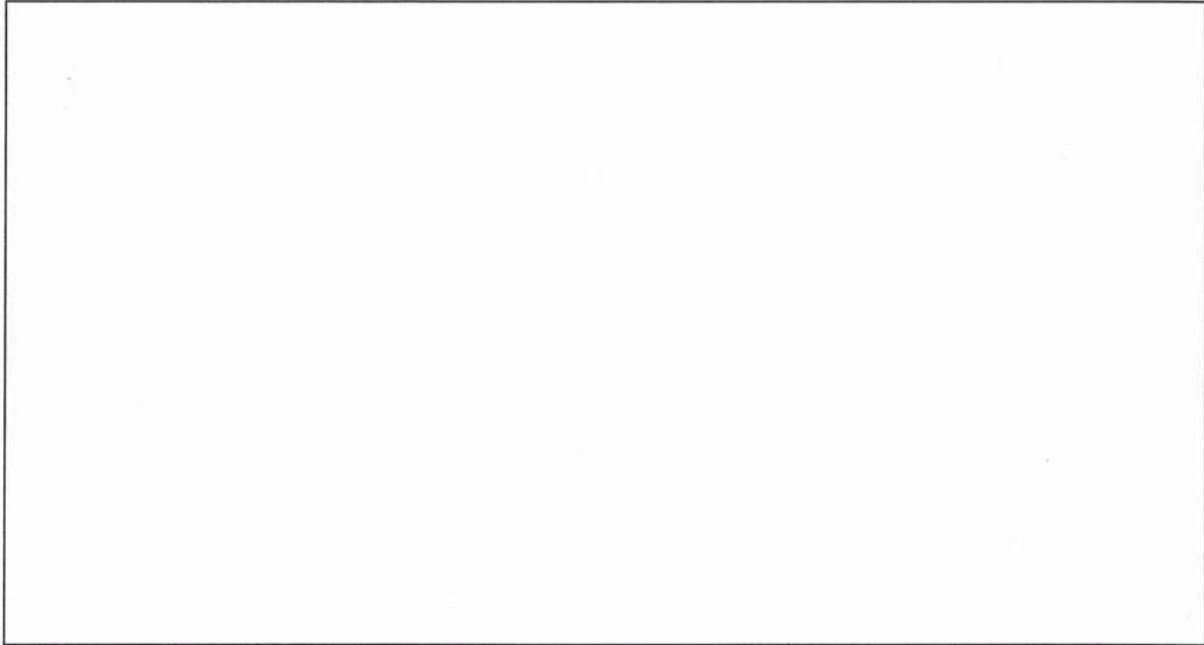
B.2. Récupération d'énergie :

Le schéma développé de puissance (alimentation du moteur) est donné document n°1 page DT1

La structure du variateur permet-elle la récupération d'énergie de freinage sur le réseau ? Justifier votre réponse.

Préciser les éléments permettant de rendre ce freinage possible et modulable.

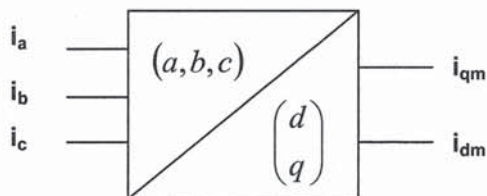
Réaliser un schéma structurel mettant en évidence ces éléments.



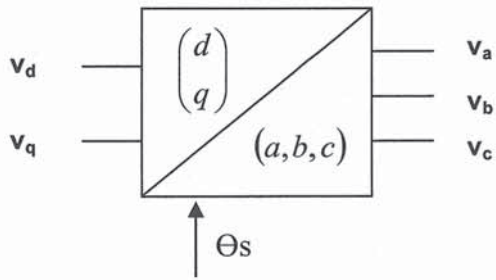
B.3. Régulation de vitesse de la machine asynchrone :

Le document n°3 page DT4 propose un schéma simplifié de la régulation de vitesse de la machine asynchrone.

Ce schéma comporte une transformation triphasé - diphasé sur la mesure des courants de ligne i_a , i_b et i_c . Celle-ci permet de calculer les courants i_{dm} et i_{qm} dans le référentiel « champs tournants ».



Une seconde transformation champs tournant – triphasé permet, à partir des tensions V_d et V_q de calculer les tensions triphasées V_a , V_b et V_c à appliquer aux bornes de la machine asynchrone via un onduleur autonome triphasé MLI.



Ces transformations constituent l'un des fondements du contrôle vectoriel de flux.

Le questionnement vise à analyser le schéma fonctionnel de régulation et d'en déduire quelques éléments de fonctionnement de cette commande de la machine asynchrone.

B.3.1.

Quelles sont les grandeurs régulées par cette commande ?

B.3.2.

Comment obtient-on l'image de la vitesse de rotation ?

B.3.3.

A partir du schéma fonctionnel, déterminer l'expression du flux rotorique ϕ_r . En déduire la grandeur de réglage du flux dans la machine.

B.3.4.

Une stratégie consiste à imposer un flux nominal dans la machine en laissant la commande ϕ_r constante :

Déterminer, à partir du schéma fonctionnel, l'expression du couple T_e , en déduire la grandeur permettant de contrôler le couple électromagnétique.

B.3.5.

En déduire l'intérêt de cette commande basée sur les transformations triphasé – champs tournant d, q. du point de vue du pilotage et de la vitesse.

B.3.6.

Un élément de réglage permet de limiter la valeur maximale du courant i_q (« limiteur »),

Quelle conséquence présente la limitation de ce courant sur les performances dynamiques de la machine ? Justifier votre réponse.

Partie C : Perturbations harmoniques sur le réseau

Le variateur de vitesse alimentant le moteur de levée est constitué d'un redresseur triphasé à diodes associé à un filtre LC formant une source de tension continue, et d'un pont onduleur à transistors IGBT. Le schéma structurel est présenté document n°2 page DT3 .

Le pont redresseur associé au condensateur de filtrage prélève au réseau un courant non sinusoïdal, son spectre harmonique est représenté par le document n°5 page DT5.

C.1. Effets des courants harmoniques :

C.1.1. Enumérer les effets des courants harmoniques sur les différents éléments du réseau (compléter le tableau) :

Eléments du réseau :	Effets des courants harmoniques
Transformateur :	
Câbles :	
Condensateurs :	
Moteurs :	
Equipements sensibles :	

C.1.2. Justifier l'absence d'harmoniques de rang 3.

C.1.3 Dans d'autres réseaux, les harmoniques de courants de rang 3 ont-ils une influence sur la section du neutre ?

C.2. Influence de l'inductance de lissage :

C.2.1. A partir des documents n° 4 et 5 de la page DT5, déterminer la fonction prépondérante de l'inductance de lissage intégrée au bus continu du variateur de vitesse.

C.2.2. On souhaite améliorer le filtrage des harmoniques de courant de rang élevé. Proposer une solution complémentaire de la solution proposée.

C.3. Nécessité d'une protection adaptée – choix et réglage du disjoncteur BT :

Le calibre du disjoncteur et son réglage sont déterminés en fonction de la valeur efficace de l'intensité du courant en ligne absorbé par le variateur.

C.3.1.

Le fondamental du courant absorbé par le variateur de vitesse I_1 est pratiquement en phase avec la tension, la valeur efficace de ce fondamental est donc, aux rendements près (moteur et variateur), proportionnelle à la puissance mécanique fournie par le moteur.

Calculer ce courant I_1 pour une puissance mécanique nominale.

C.3.2.

Le spectre harmonique du courant absorbé par le variateur de vitesse est donné par le document n°5 de la page DT5

- Calculer le taux global de distorsion harmonique en courant THDi (on se limite au rang 19).

On précise :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} Xk^2}}{X1} \times 100 \quad \text{exprimé en \%}.$$

- Exprimer I_{eff} , valeur efficace de l'intensité du courant, en fonction du taux global de distorsion harmonique en courant THDi et de la valeur efficace du fondamental du courant I_1 .

- Calculer la valeur efficace de l'intensité du courant absorbé par le variateur de vitesse.

C.3. 3.

Une surcharge permanente de $1,1 T_n$ est admise,

Le disjoncteur choisi a pour référence : NS400N. Le déclencheur associé est de type STR 23 SE (documents techniques page 8). Ces matériels sont-ils adaptés ?

C.4. conformité du variateur aux normes :

C.4.1. Courants harmoniques :

Pour les variateurs de vitesse la norme IEC 61800-3 s'applique, elle fait référence à plusieurs normes de base en fonction de la puissance du variateur de vitesse.

- IEC 61000 3-2 pour les appareils consommant moins de 16 A par phase.
- IEC 61000 3-4 rapport technique (future norme 61000 3-12 en préparation) pour les appareils consommant plus de 16 A par phase.

Les limites normatives du taux global de distorsion harmonique en courant THDi ainsi que les courants individuels harmoniques prennent en compte la puissance de l'équipement générateur d'harmoniques relativement à la puissance de court-circuit au point de raccordement de cet équipement.

$$S_{cc} = \frac{U_n^2}{Z_c}; \quad z_c \text{ est l'impédance du circuit au point de raccordement de l'équipement}$$

(voir Document DT2)

Ces limites sont fonction d'un rapport de court-circuit

tableau n°6 page DT9.

$$Rsce = \frac{S_{cc}}{S_{\text{équipement}}} \text{ et précisées par le}$$

Vérifier la conformité du variateur de vitesse en fonction des recommandations du rapport technique 61000 3-4.

C.4.2. Influence sur la tension :

On néglige les résistances des éléments en amont du point de raccordement de l'équipement. Dans ce cas l'impédance $Z_c = L_c \omega$.

On propose 2 schémas équivalents : le premier à la fréquence du fondamental, le second à la fréquence harmonique f_k .

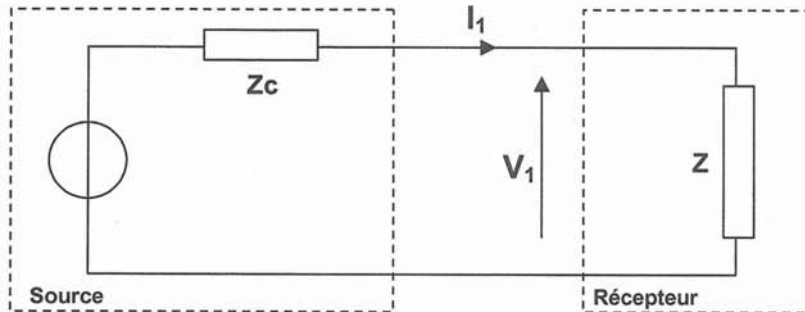


Schéma équivalent à la fréquence du fondamental

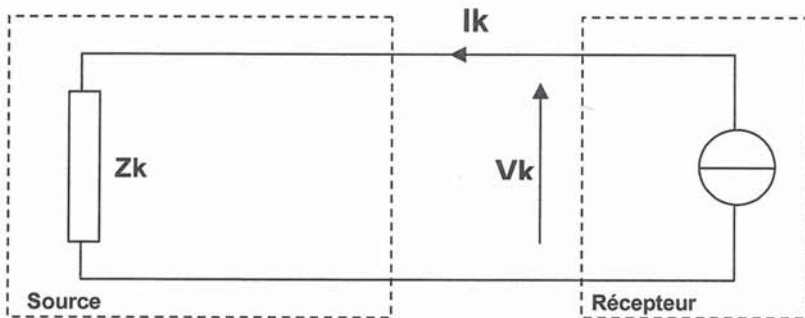


Schéma équivalent à la fréquence harmonique f_k

C.4.2.1. Calculer les impédances Z_k , l'intensité du courant harmonique I_k , les tensions V_k correspondantes ainsi que le taux harmonique $\frac{V_k}{V_1} \times 100$ exprimé en %.

NB : A partir de cette question, la valeur de l'intensité du courant fondamental $I_1 = 250$ A

Rang harmonique k	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
Fréquence (Hz)	50									
Z_k (Ω)										
I_k (A)	250 A									
V_k (V)	230 V									
$\frac{V_k}{V_1} \times 100$	100%									

C.4.2.2. Calculer le taux global de distorsion harmonique en tension THDu (on se limite au rang 19)

C.4.2.3.

- Comparer les taux harmoniques $\frac{V_k}{V_1} \times 100$ en % aux taux maxima définis par la norme CEI 61000 2-4 (installation industrielle basse tension, matériel de classe C2 : standard) ainsi que le taux global de distorsion harmonique en tension THDu.

Ces limites sont définies dans le tableau n°7 page DT9.

- Conclure sur la conformité du variateur de vitesse à la norme CEI 61000 2-4.

Partie D : Compatibilité électromagnétique

On s'intéresse aux perturbations hautes fréquences créées par les équipements électriques de puissance, et notamment le variateur de vitesse.

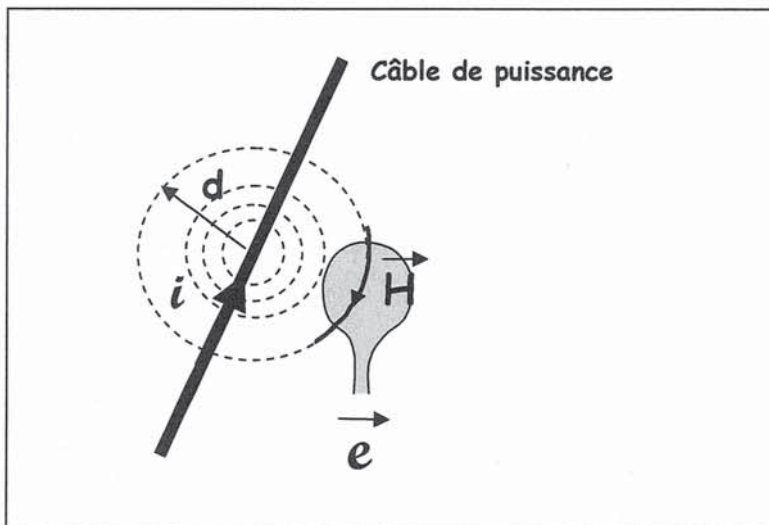
(Les fronts brutaux générés par les commutations des composants de l'électronique de puissance sont de véritables générateurs de perturbations hautes fréquences).

D.1. Définition :

Donner une définition de la compatibilité électromagnétique entre deux équipements.

D.2. Couplage magnétique – Perturbations rayonnées :

D.2.1. Effet d'un champ magnétique sur une boucle :



Effet d'un champ magnétique sur une boucle

- Exprimer, en appliquant le théorème d'ampère, le champ d'excitation magnétique H à une distance d du conducteur de puissance, source de perturbations.

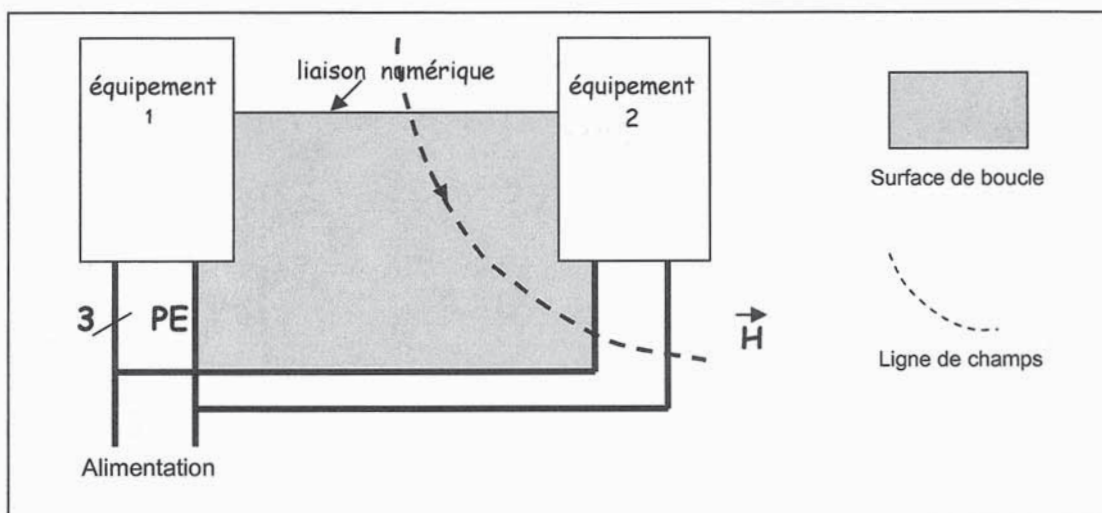
- On note μ_0 la perméabilité de l'air, rappeler l'expression du champ magnétique B fonction de H . Préciser les unités.

- On suppose un fil de forme circulaire centré sur le câble de puissance de rayon d et de surface S , déduire la tension e induite conclure sur l'influence de la surface de la boucle sur cette tension induite.



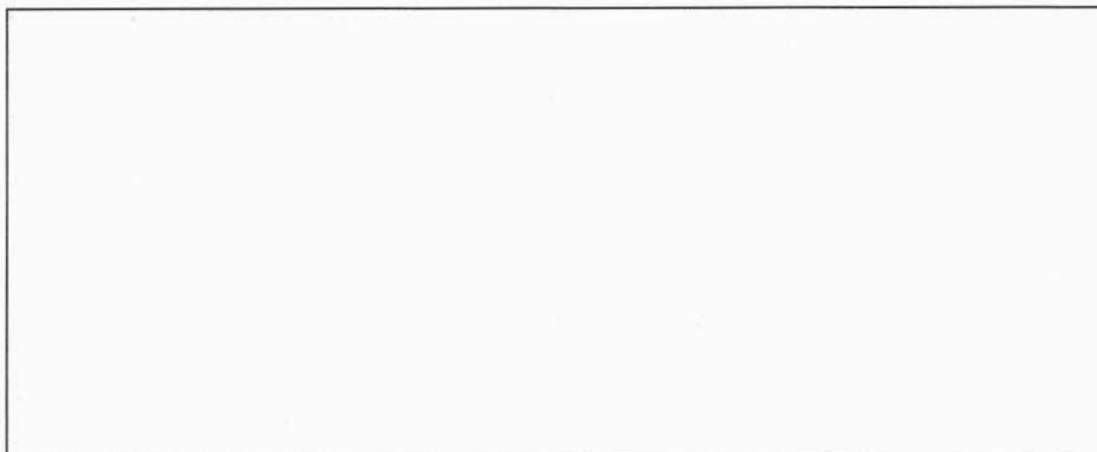
D.2.2. Conséquence de l'effet de boucle :

Exemple de deux équipements :



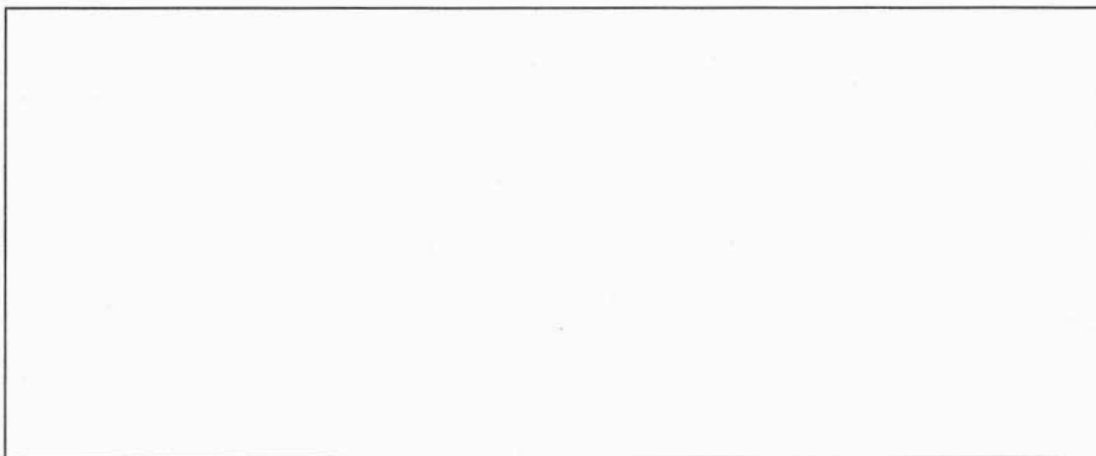
Boucle réalisée par les câbles d'alimentation et une liaison numérique

- Proposer un cheminement différent des câbles évitant l'effet de boucle (réaliser un rapide croquis)



Une liaison numérique chemine sur le même chemin de câble que des câbles de puissance :

- Proposer une répartition de ces câbles sur la tablette (Réaliser un dessin où vous ferez apparaître les câbles de nature différente)
- Justifier la mise en place éventuelle d'un couvercle est-elle judicieuse.



D.3. Courants de fuite Hautes Fréquences – perturbation conduite :

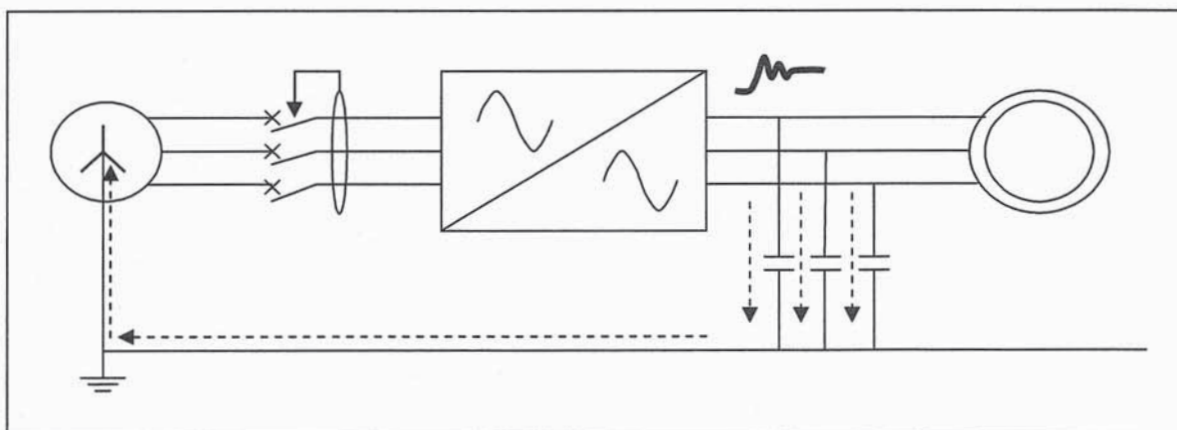
Origine du phénomène :

La forme de la tension délivrée par l'onduleur de tension et en particulier les fronts de tension générés par la commutation des transistors IGBT (dV/dt important de 2 à 10 $kV/\mu s$) est à l'origine de courants de fuite hautes fréquences.

Ces courants circulent par les capacités de fuite entre différents éléments (transistor, câble moteur, enroulement moteur) et la terre.

La réactance d'un condensateur est inversement proportionnelle à la fréquence et tend vers zéro en hautes fréquences, il se comporte alors comme un court-circuit.

La longueur du câble entre l'onduleur et le moteur rend prépondérant celui-ci pour l'étude de ces courants de fuite.



Courants de fuite HF au travers des capacités du câble moteur

D.3.1.

Proposer des solutions permettant de limiter les courants de fuite HF.



D.3.2.

Préciser le risque encouru par le DDR placé en aval du variateur. Indiquer comment s'en prévenir.



D.3.3.

A partir de la documentation constructeur (tableau n°2 et 3, page DT6 et DT7) :

- Préciser les solutions proposées par le constructeur pour limiter les courants de fuite HF.
- Choisir l'inductance moteur placée en aval du variateur (voir schéma développé de puissance), sachant que ce câble blindé (avec blindage relié à la masse sur 360° aux deux extrémités) a une longueur de 90 mètres.
- Préciser en quoi la reprise sur 360° est importante en haute fréquence.

