

épreuve d'automatique – informatique industrielle

Durée : 4 heures

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

Tout document et tout autre matériel électronique sont interdits

Le candidat doit obligatoirement traiter les **quatre parties** sur des **copies distinctes**, en précisant bien sur chaque copie le titre, le repère et la partie de l'épreuve traitée.

Motorisation des remorques sur un convoi polaire

Remarque préliminaire

Le sujet commence par une présentation générale du système étudié, qui contient des informations nécessaires pour les 4 parties A, B, C et D à traiter.

Ces parties sont indépendantes. Elles doivent être traitées sur des copies séparées.

Figures

Figure 1 : vue générale d'un convoi

Figure 2 : trajet des convois

Figure 3 : remorque de type traîneau

Figure 4 : remorque sur boggies

Figure 5 : détail d'une remorque

Figure 6 : implantation de la chaîne de transmission

Figure 7 : structure d'un module de base

Figure 8 : paramétrage dimensionnel d'un module de base

Figure 9 : paramétrage plan du convoi

Figure 10 : bloc fonctionnel d'un module

Figure 11 : simulation de la vitesse des remorques

Figure 12 : évolution du couple moteur

Figure 13 : sous-système asservi étudié

Figure 14 : diagramme bloc de l'asservissement des effort inter-remorques.

Figure 15 : séquence de commande du régime établi du mode « remorques guidées »

Figure 16 : séquence de commande du régime établi du mode « remorques libres »

Présentation du système

Description générale

Le système étudié est un convoi constitué d'un tracteur et de 1 à 4 remorques. Ce système évolue sur le continent Antarctique. Il transporte le matériel débarqué sur la côte vers les bases scientifiques situées à l'intérieur du continent Antarctique. Dans un convoi standard, les remorques ne sont pas motorisées.



Figure 1 : vue générale d'un convoi

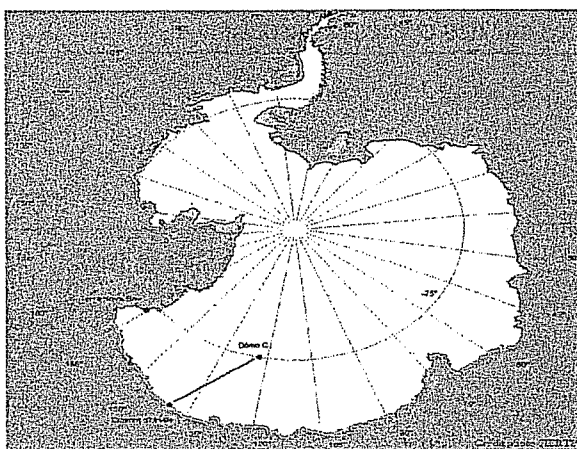


Figure 2 : trajet des convois

Les remorques sont de 2 types : sur patins (traîneau), ou sur boggies. Compte-tenu de l'importance de cette base et de la grande quantité de matériel à transporter, il a été décidé de motoriser les remorques sur boggies.

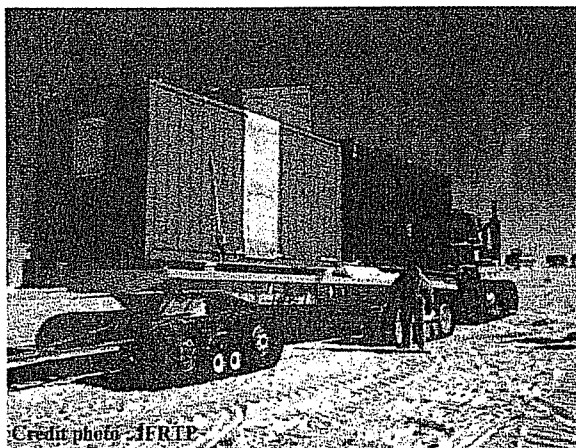


Figure 4 : remorque sur boggies

Le projet Concordia consiste à installer une base scientifique Franco-Italienne à l'intérieur du continent Antarctique. Le matériel est acheminé depuis la côte, vers le site de construction de la base : le Dôme C. Le trajet, long de 1110 km est effectué pendant la saison australe, sur une piste de neige compactée.



Figure 3 : remorque de type traîneau

Cette disposition doit permettre d'accroître la charge transportée par chaque convoi, en soulageant le tracteur principal.

L'objet de cette épreuve est l'étude de la motorisation d'une remorque sur boggie et l'analyse de la commande d'un convoi composé d'un tracteur attelé à au plus 4 remorques motorisées.

Présentation succincte du cahier des charges

Les performances générales fixées pour un convoi sont les suivantes :

- Le convoi doit être capable de démarrer de manière autonome. La vitesse de croisière sera atteinte au plus en 5 minutes.
- Le convoi évolue à une vitesse de croisière de 10 km/h en charge et de 20 km/h à vide.
- Le convoi doit suivre la direction imposée par le conducteur. Le trajet est composé de lignes droites et de courbes modérées. En effet, l'angle de braquage entre le tracteur et la première remorque ne dépasse pas 20°.

Les caractéristiques générales d'une remorque sont :

- Masse à vide : 12 tonnes.
- Masse du fret : 20 tonnes.

Compte tenu de la nature du terrain, on distingue 3 modes d'évolution :

- L'évolution « remorques guidées », lorsque la piste est bien marquée et que toutes les remorques restent « guidées » par la trace du tracteur sur la piste, à la manière d'un train sur des rails.
- L'évolution « remorques libres », lorsque la piste est moins marquée et que les remorques ne sont plus guidées latéralement par la piste. Le convoi évolue alors à la manière d'un convoi de chariots à bagages sur le quai d'une gare.
- L'évolution « remorques glissantes », lorsque la piste est abîmée (crevasses, blocs de glace), ou lorsque le convoi n'est plus sur la piste préparée. Les remorques glissent alors au gré des accidents de terrain rencontrés.

La commande à concevoir doit permettre l'ensemble de ces évolutions. ***La condition générale à respecter pour que la trajectoire puisse être maîtrisée par le conducteur est qu'un élément dans le convoi soit toujours tiré par l'élément qui le précède.***

L'effort de traction maximal que le tracteur peut fournir est de 3750 daN. Au delà, le tracteur patine. Le cahier des charges fixe l'effort de traction entre un élément de l'attelage et son successeur à 500 daN.

Sur le plan de l'utilisation et de l'entretien, le système devra bien sûr résister à l'environnement du continent Antarctique (températures très basses, taux d'humidité très faible). Les remorques devront s'atteler rapidement et sans outillage particulier. Pour cela, il faut conserver le mode d'attelage très simple existant, c'est à dire la mise en place d'un axe dans une chape liée à la remorque précédente, et qui traverse un anneau lié au timon de la remorque suivante. Le jeu entre l'axe et l'anneau du timon est de l'ordre de 3mm. L'ordre des remorques pourra être inversé. L'entretien du système devra être aussi réduit que possible et à la portée de tout technicien non spécialisé.

Architecture et composants choisis

Les moteurs électriques retenus sont de type asynchrone. Ils sont pilotés par des variateurs de fréquence. La commande détaillée des moteurs sera étudiée dans la suite.

Vocabulaire :

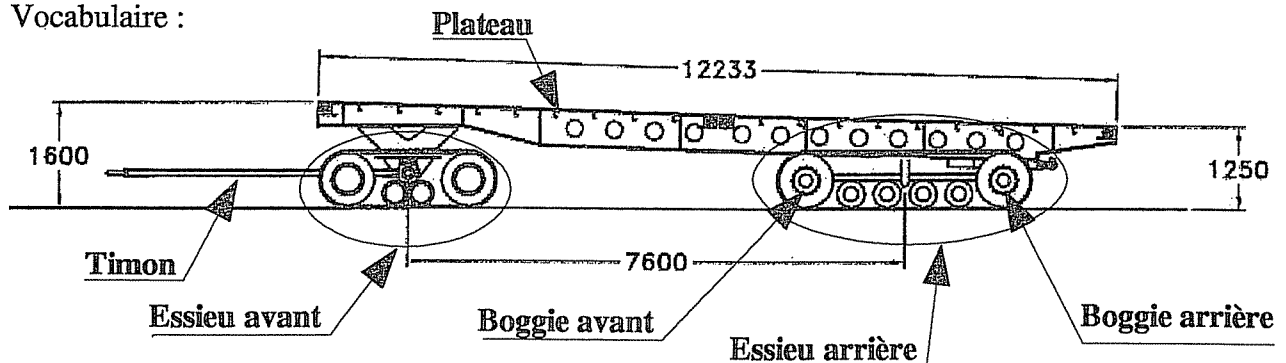


Figure 5 : détail d'une remorque

Implantation des composants mécaniques

Il est décidé d'implanter la motorisation uniquement sur l'essieu arrière de la remorque. Chaque chenille sera équipée d'un moteur (1 moteur pour la chenille gauche, 1 moteur pour la chenille droite). Les moteurs entraînent le boggie arrière de l'essieu. Les moteurs sont installés verticalement. La chaîne de transmission retenue est la suivante :

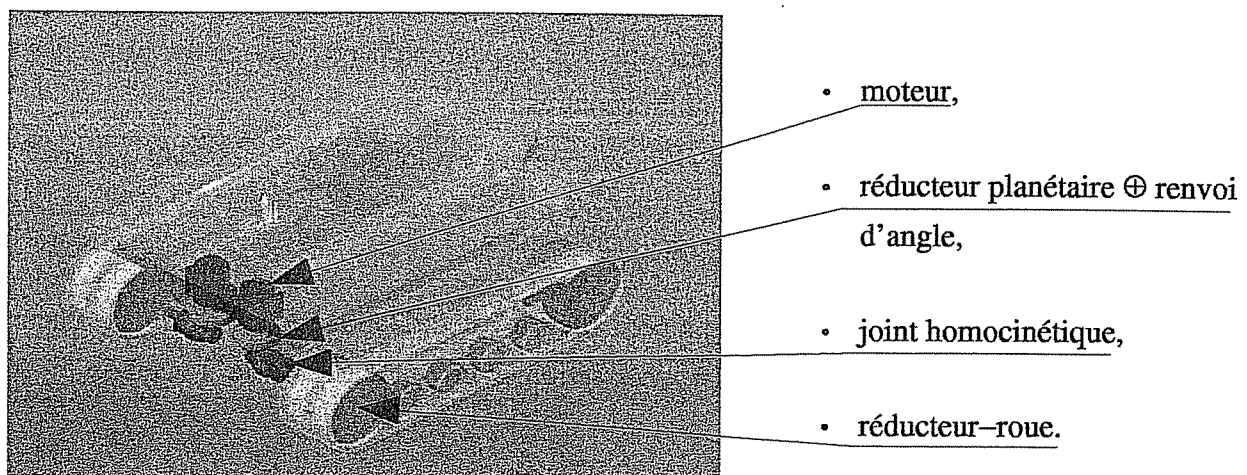


Figure 6 : implantation de la chaîne de transmission

Implantation des composants électroniques

L'électronique des variateurs de fréquence doit être mise puis maintenue à température de fonctionnement. Un variateur doit être placé près du moteur qu'il pilote. Par conséquent, les variateurs seront implantés dans des caissons climatisés situés sur les remorques.

Partie A – Étude de l'architecture du système

Q 1 – Justifier la condition énoncée dans la présentation du système, pour que la trajectoire d'un convoi puisse être maîtrisée par son conducteur : un élément dans le convoi doit toujours être tiré par l'élément qui le précède.

Q 2 – Justifier l'implantation de la motorisation sur le boggie arrière de l'essieu.

La chaîne de transmission retenue comprend deux étages de réduction (le réducteur planétaire et le réducteur-roue). On aurait pu toutefois proposer deux types de solution n'utilisant qu'un seul étage de réduction.

Q 3 – Analyser les avantages et les inconvénients relatifs entre ces 2 solutions alternatives qui se distinguent par la place de l'unique étage de réduction dans la chaîne de transmission. Quelle est notamment l'influence de chacune de ces solutions sur le dimensionnement des composants retenus ?

Q 4 – Quel est l'avantage de la chaîne de transmission retenue qui comprend 2 réducteurs ?

Q 5 – Pourquoi la distance entre un moteur et son variateur est-elle limitée ?

Partie B – Choix d'une stratégie de pilotage

Pour évaluer les différentes stratégies de commande envisageables, il est nécessaire de connaître précisément la nature des trajets à effectuer.

Dans le mode d'évolution « **remorques guidées** », tous les éléments de l'attelage suivent exactement le même trajet, à la même vitesse. Le **trajet** de chaque élément est donc **prévisible**.

Dans le mode d'évolution « **remorques glissantes** », le **trajet** exact de chaque élément du convoi n'est **ni modélisable, ni prévisible**. La commande doit s'adapter à cette situation.

Reste le mode d'évolution « **remorques libres** ». Nous allons nous attacher à **simuler** le trajet du convoi pour cette situation.

Modélisation d'un module de base du convoi

Le principe de base est celui de la décomposition d'un convoi en un assemblage d'un même module de base.

Le paramétrage de chaque module de la série reflète les grandeurs réelles du convoi.

Le module de base est un solide indéformable ne comportant aucune articulation interne. C'est l'équivalent d'un essieu assemblé avec un timon.

Chaque remorque du convoi est composée de deux modules, dont un va être motorisé.

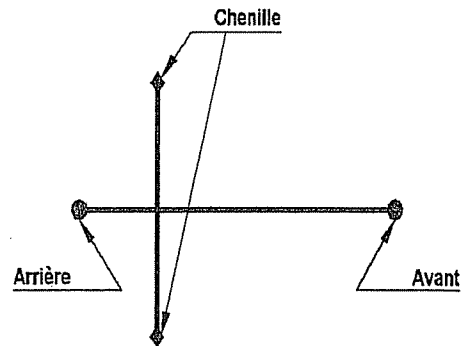


Figure 7 : structure d'un module de base

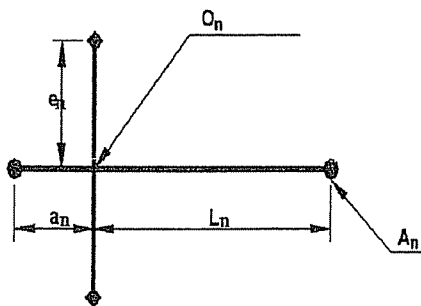


Figure 8 : paramétrage dimensionnel d'un module de base

Les paramètres dimensionnels d'un module sont :

- son empattement : $2 * e_n$,
- la longueur du timon : L_n ,
- sa longueur totale : $L_n + a_n$.

On définit des points particuliers :

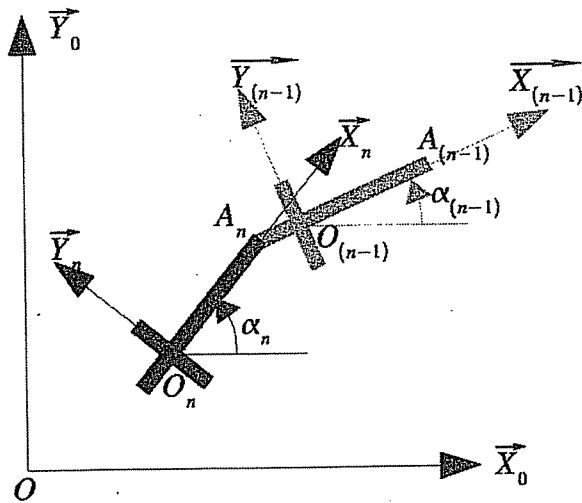
- une origine locale du module n : O_n ,
- le point d'ancrage du module n au module précédent : A_n .

On associe à chaque module n un repère $(O_n, \vec{X}_n, \vec{Y}_n, \vec{Z}_n)$ (figure 9).

La position du module n du convoi est exprimée par rapport à un repère $R_0 : (O, \vec{X}_0, \vec{Y}_0, \vec{Z}_0)$ en utilisant les coordonnées du point $O_n : (x_n, y_n, z_n)$ et l'angle entre \vec{X}_0 et $\vec{X}_n : \alpha_n$

La figure 9 représente partiellement le modèle élémentaire du convoi. Chaque élément du convoi peut être modélisé par 2 modules consécutifs : l'un motorisé et l'autre non. Ainsi, la schématisation de la figure 9 peut être interprétée de la manière suivante : le module arrière (motorisé) d'une

remorque (module $n-1$) tracte le module avant (non motorisé) de la remorque suivante (module n). Ce modèle partiel est applicable aux liaisons entre les 2 modules d'une même remorque ou du tracteur, ou à la liaison entre le tracteur la première remorque.



Le problème est assimilé à un problème plan. Les accidents de terrain de la piste (creux, bosses) sont négligés.

Le torseur cinématique représentant la vitesse du module n par rapport au repère R_0 , exprimé au point O_n est le suivant :

$$\begin{bmatrix} 0 & u_n \\ 0 & v_n \\ \dot{\alpha}_n & 0 \end{bmatrix}$$

Figure 9 : paramétrage plan du convoi

L'objectif est de modéliser le module de base n par un bloc fonctionnel où les caractéristiques cinématiques du module précédent $n-1$ ainsi que les dimensions du module n permettent de déterminer les caractéristiques cinématiques du module n .

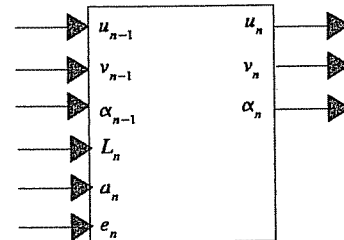


Figure 10 : bloc fonctionnel d'un module

Q 6 – Exprimer la condition de traction du module n par le module précédent.

Q 7 – En déduire une relation entre : u_n, u_{n-1}, α_n et α_{n-1} .

Q 8 – En déduire une relation entre : v_n, v_{n-1}, α_n et α_{n-1} .

On fait l'hypothèse qu'il y a roulement sans glissement entre les chenilles et la piste.

Q 9 – Exprimer la condition de roulement sans glissement entre les chenilles et la piste.

Q 10 – Exprimer $\dot{\alpha}_n$ en fonction des entrées du bloc fonctionnel, ou des signaux issus directement de ces entrées (intégrale, dérivée).

Q 11 – Exprimer u_n en fonction des entrées du bloc fonctionnel, ou des signaux issus directement de ces entrées (intégrale, dérivée).

Q 12 – Exprimer v_n en fonction des entrées du bloc fonctionnel, ou des signaux issus directement de ces entrées (intégrale, dérivée).

Ces relations permettent de construire le bloc fonctionnel.

Pour simuler le comportement du convoi, en mode d'évolution « remorques libres », dans un virage, *on construit tout d'abord un modèle du convoi*. Dans ce modèle, le tracteur du convoi est assimilé à un seul timon de longueur nulle : $L_{tracteur}=0$. On définit pour le tracteur une loi de vitesse constante. On fixe l'angle de braquage du tracteur à la valeur constante de 20° pendant la durée d'un virage (c'est l'angle de braquage maximum du tracteur en utilisation réelle).

Après avoir connecté les blocs fonctionnels entre eux, il est ensuite possible de *simuler le modèle* retenu pour le convoi pendant un virage. Les résultats de cette simulation sont donnés figure 11.

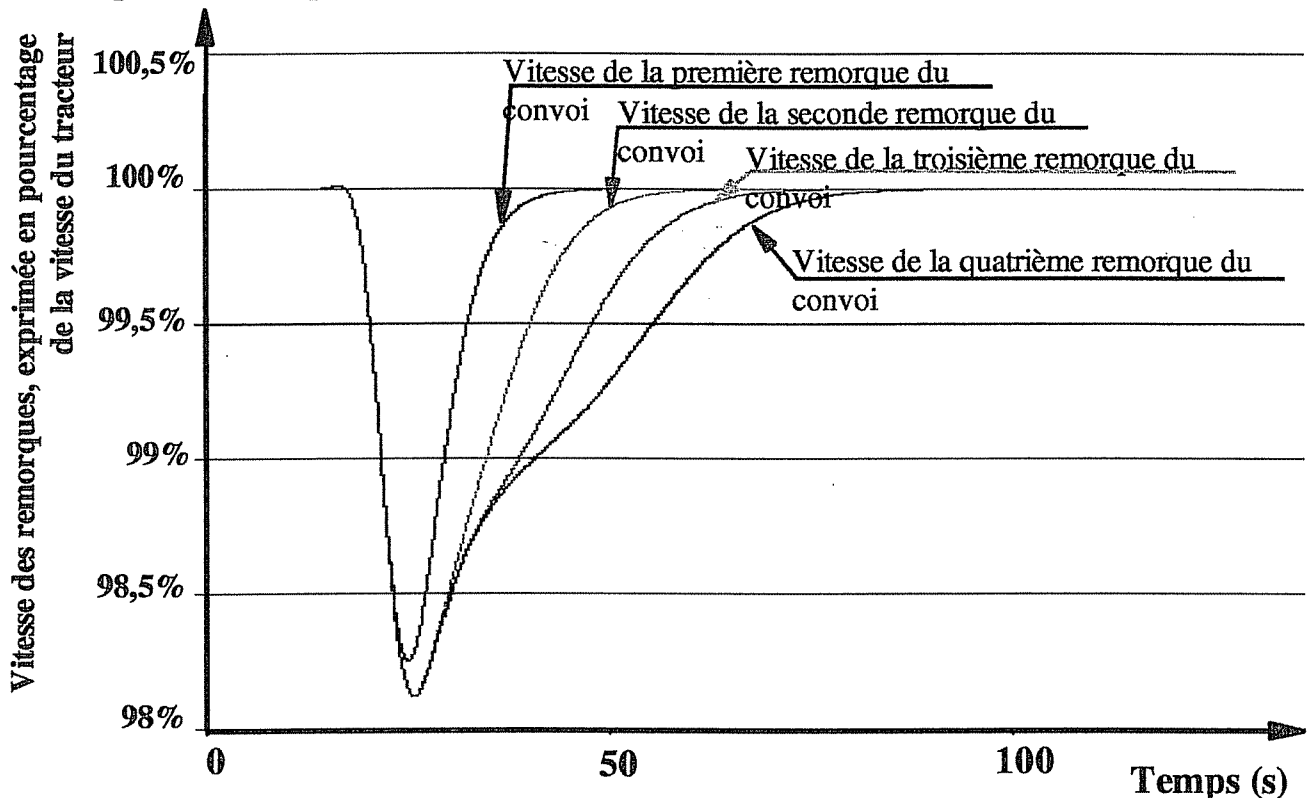


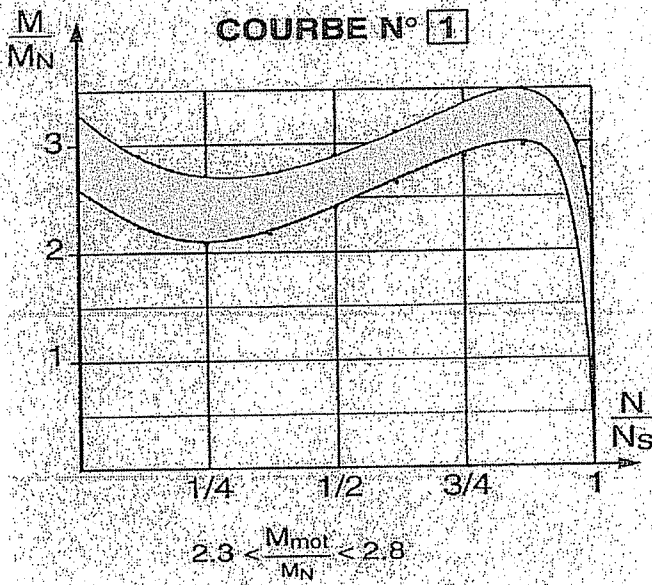
Figure 11 : simulation de la vitesse des remorques

Les résultats représentent la vitesse de chaque remorque exprimée, à chaque instant, en pourcentage de la vitesse du tracteur.

- Q 13** – Sur le document réponse DR1, compléter le modèle du convoi en ajoutant les blocs fonctionnels nécessaires, et en les connectant. (Indiquer les valeurs numériques si elles sont disponibles).
- Q 14** – Reporter sur le modèle du document réponse DR1 les points de prélèvement des vitesses permettant de tracer les courbes de la figure 11.
- Q 15** – Sur le document réponse DR2, tracer (qualitativement) l'allure du trajet d'un point caractéristique de chaque remorque. Justifier votre tracé.

Étude de la stratégie de pilotage direct des moteurs

Pour répondre au cahier des charges et assurer un effort de traction de 500 daN entre un élément du convoi et son successeur, une première idée est de piloter cet effort en boucle ouverte, en agissant uniquement sur le couple moteur délivré dans chaque remorque. La génération de couples moteur décroissants au fil du convoi permet d'obtenir cette traction effective de 500 daN entre deux remorques successives.



Pour un moteur asynchrone, le couple moteur délivré dépend du rapport entre la fréquence de rotation du moteur, et la fréquence d'excitation du moteur : N_s . La figure 12 représente l'allure du couple moteur en fonction de ce rapport.

N : fréquence de rotation du moteur.

N_s : fréquence d'excitation du moteur.

M : couple moteur délivré.

M_N : couple nominal

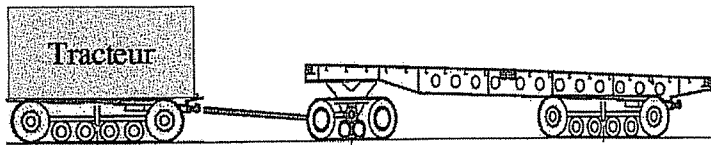
Figure 12 : évolution du couple moteur

Le principe retenu est donc d'agir sur la fréquence de synchronisme, pour contrôler le couple moteur délivré à chaque remorque.

- Q 16** – Cette stratégie de pilotage est-elle envisageable dans le mode d'évolution « remorques guidées » ? Justifier votre point de vue.
- Q 17** – Cette stratégie de pilotage est-elle envisageable dans le mode d'évolution « remorques libres » ? Justifier votre point de vue.
- Q 18** – Cette stratégie de pilotage est-elle envisageable dans le mode d'évolution « remorques glissantes » ? Justifier votre point de vue.

Partie C – Étude de l'asservissement des efforts inter-remorques

Pour étudier le comportement de ce type de commande, nous nous limitons à un convoi composé d'un tracteur (représenté ici de manière simplifiée) et d'une seule remorque. Nous supposons que le tracteur circule en ligne droite, à une vitesse constante V_t . Nous analysons le comportement de la remorque. Nous faisons l'hypothèse que seul le timon de la remorque est déformable. L'ensemble constitué par l'essieu avant, le plateau et l'essieu arrière



de la remorque est lui considéré indéformable. La remorque est supposée chargée au maximum. La vitesse de la remorque est V_r .

Figure 13 : sous-système asservi étudié

Présentation du pilotage retenu

Une évolution de la stratégie de pilotage direct des moteurs (cf. questions précédentes en fin de partie B) est de combiner ce pilotage par action sur le couple moteur, avec une régulation de l'effort sur le timon.

Les deux consignes de base de cette commande sont d'une part la consigne d'effort sur le timon :

F_{tc} dont la valeur est de 500 daN, d'autre part la consigne de couple moteur à délivrer par chacun des moteurs : C_{mc} . La valeur de C_{mc} est de 660 Nm pour un déplacement à vitesse constante et en ligne droite.

La variable de retour utilisée dans cet asservissement dépend de l'effort réel de traction entre le tracteur et la remorque : F_t , observé par un capteur d'effort placé dans l'anneau du timon. On considère ce capteur parfaitement linéaire, de gain K_c . L'écart observé entre F_t et F_{tc} sert à moduler la consigne de couple moteur C_{mc} , via un correcteur que nous n'étudierons pas. La figure 14 représente le diagramme-bloc qui correspond à la **commande d'un seul moteur** d'une remorque, ce qui explique la prise en compte de $F_t/2$, $F_{tc}/2$ au même titre que $M/2$.

Chaque moteur, associé à un variateur de fréquence, est piloté en technologie DTC (Direct Torque Control). Pour une commande du couple moteur, cette technologie permet d'avoir un temps de réponse très court et une excellente précision. Par conséquent, pour une première étude d'avant-projet, nous négligerons la réponse de la commande du moteur devant la réponse du système mécanique. Ainsi, dans le diagramme-bloc, on suppose que le couple moteur fourni C_m est constamment égal à la consigne de couple moteur C_{mc} , modulée par l'écart entre F_t et F_{tc} . Nous modélisons le timon par un ressort de raideur K_t .

Ω_m représente la fréquence de rotation de chacun des moteurs.

La masse totale M de la remorque est de 32 tonnes.

Nous introduisons dans le diagramme bloc une perturbation sur F_t , qui sera étudiée par la suite.

Le diagramme bloc retenu pour modéliser la commande de la remorque est représenté sur la figure 14.

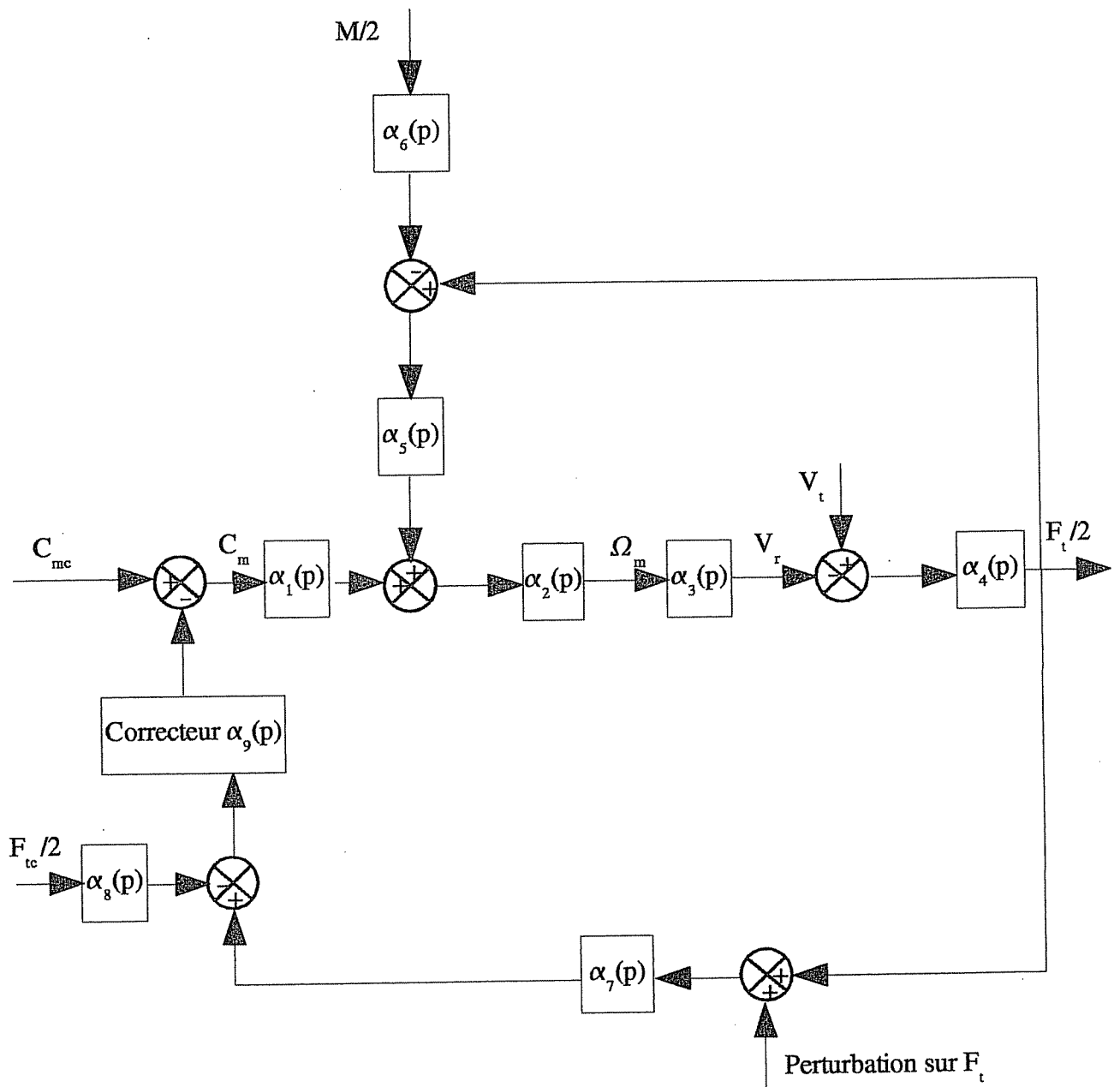


Figure 14 : diagramme bloc de l'asservissement des effort inter-remorques.

Le coefficient de résistance au roulement au niveau du contact chenille/sol est : $K_s = 0,235$.

Le rendement global de la chaîne de transmission entre le moteur et la chenille est : $\eta = 0,85$.

Le rapport de réduction total de la chaîne de transmission est : $r = 30$.

L'inertie de la remorque est prise en charge de manière équivalente par chacun des 2 moteurs. Au niveau de chaque arbre moteur, on a alors une inertie correspondante qui sera notée J_e .

Le diamètre des roues d'entraînement du bogie arrière des remorques est : $D = 0,95m$.

Q19 – Compléter le diagramme–bloc sur le document réponse DR3, en indiquant systématiquement en entrée et en sortie de bloc, la grandeur physique utilisée (masse, force, couple, tension, etc.).

Q 20 – Exprimer $\dot{\Omega}_m$ en fonction de C_m , η , F_t , K_s , M , D , r et J_e .

Q 21 – En déduire les fonctions de transfert $\alpha_1(p)$, $\alpha_2(p)$, $\alpha_3(p)$, $\alpha_4(p)$, $\alpha_5(p)$ et $\alpha_6(p)$.

Q22 – Exprimer $\alpha_7(p)$ et $\alpha_8(p)$.

Dans la suite de l'étude, nous allons étudier successivement l'influence de phénomènes séparés. Dans le système réel, ces phénomènes peuvent apparaître simultanément avec d'autres phénomènes non étudiés ici.

Q23 – Justifier la possibilité de séparer les cas d'étude. Quel est l'intérêt de cette démarche?

Le premier phénomène étudié est l'influence sur le système d'une coupure de la boucle retour, alors que le convoi circule à vitesse stabilisée, en ligne droite, sans autres perturbations. Le retour d'effort mesuré par le capteur situé dans l'anneau du timon est donc nul.

Q24 – A quel phénomène réel associe-t-on ce cas d'étude ?

Q25 – Tracer qualitativement dans ce cas l'évolution des grandeurs F_t et C_m en fonction du temps. Vous traiterez 2 évolutions : d'une part l'évolution attendue des consignes, d'autre part l'évolution des consignes à éviter.

Le second phénomène étudié est l'influence de l'apparition d'une impulsion de Dirac sur l'entrée « perturbation de F_t » du diagramme bloc, alors que le convoi circule à une vitesse donnée, mais que F_t est nulle. Considérons que la valeur maximale de cette impulsion est le double de F_{tc} .

Q26 – A quel phénomène réel associe-t-on ce cas d'étude ?

Q27 – Tracer qualitativement dans ce cas l'évolution des grandeurs F_t et C_m en fonction du temps. Vous traiterez 2 évolutions : d'une part l'évolution attendue des consignes, d'autre part l'évolution des consignes à éviter.

Pour limiter les conséquences des deux phénomènes précédents, on décide de modifier le système.

Q28 – Proposer une solution permettant d'obtenir effectivement une limitation des conséquences des deux phénomènes précédents.

Q29 – Intégrer cette modification au diagramme bloc.

Enfin, nous nous intéressons au réglage du correcteur mis en place. Nous retenons un correcteur de type P.I.D.

Q30 – Quelle(s) caractéristique(s) du correcteur doit-on privilégier ?

Q31 – Quelles caractéristiques de comportement du système vous paraissent essentielles pour déterminer les valeurs numériques du correcteur ?

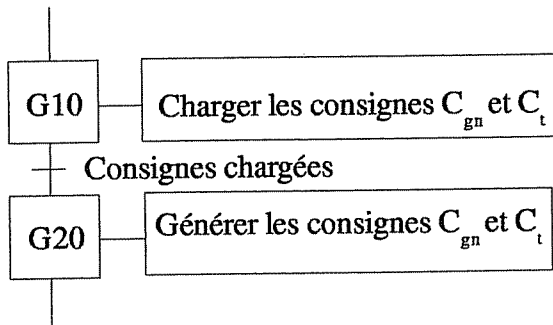
Partie D – Étude des modes de contrôle

L'objectif de cette partie de l'étude est d'étudier (partiellement) la manière dont les différents modes de contrôle nécessaires pour faire fonctionner le convoi dans toutes les situations vont être coordonnés.

Commande des régimes établis

Dans le mode d'évolution « remorques guidées », tous les éléments de l'attelage suivent exactement le même trajet, à la même vitesse. En régime établi, c'est à dire hors phase de démarrage et d'arrêt du convoi, on délivrera donc une consigne de couple C_{gn} fixe à chaque moteur de remorque n . Pour qu'un élément du convoi soit toujours tiré par celui qui le précède, on aura : $C_{g1} > C_{g2} >$

$C_{g3} > C_{g4}$ pour un convoi de 4 remorques (la remorque 1 étant celle placée juste derrière le tracteur). Le tracteur aura lui pour consigne de couple C_t



Par conséquent, la séquence de commande correspondant à cette situation (activation du mode de contrôle « remorques guidées » en régime établi) est celle de la figure 15.

Figure 15 : séquence de commande du régime établi du mode « remorques guidées »

Dans le mode d'évolution « remorques libres », les remorques ne sont plus guidées latéralement par la piste. Par conséquent, il peut y avoir des différences de vitesses allant jusqu'à 2% entre deux éléments successifs du convoi. En régime établi, on modulera la consigne C_{gn} de chaque

remorque en fonction de l'écart entre l'effort de traction réel sur le timon de la remorque :

F_m (mesuré par un capteur de force placé dans ce timon) et la consigne pour cet effort : F_{tcn} . En régime établi, $F_{tcn} = 500$ daN pour toutes les remorques. Dans la séquence de commande correspondant à ce mode de

contrôle (figure 16), on représente cette opération de régulation des F_m par une macro-étape « Régulation des F_m ».

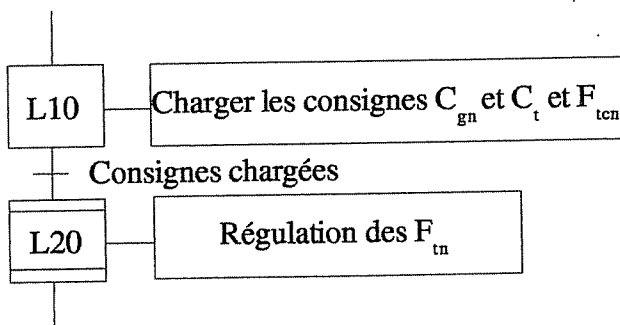


Figure 16 : séquence de commande du régime établi du mode « remorques libres »

Dans le mode d'évolution « remorques glissantes », les remorques glissent largement au gré des accidents de terrain rencontrés.

Q32 – Proposer un mode de contrôle du convoi pour le mode d'évolution « remorques glissantes » en régime établi.

Q33 – Représenter la séquence de commande correspondant à ce mode de contrôle « remorques glissantes » en régime établi. (Utiliser le formalisme des figures 15 et 16, en numérotant les étapes sous la forme G_{lx} ($GL10$, $GL20$ etc.)).

Changements de mode de contrôle

On fait l'hypothèse qu'une chenille de chaque essieu motorisé est équipée d'un tachymètre. Après traitement de l'information de ces tachymètres, on dispose de V_m , vitesse de déplacement (translation) de l'essieu de la remorque n équipé du tachymètre. La vitesse du tracteur est V_t .

Q34 – Exprimer la condition de passage dans le mode de contrôle « remorques guidées en régime établi ».

Q35 – Exprimer la condition de passage dans le mode de contrôle « remorques libres en régime établi ».

Q36 – Exprimer la condition de passage dans le mode de contrôle « remorques glissantes en régime établi ».

Q37 – Relier les séquences de commande de ces 3 modes de contrôle dans un grafcet, en utilisant les conditions des questions 34, 35 et 36.

Q38 – Est-il souhaitable de changer de mode de contrôle dès qu'une des conditions de changement est identifiée ? Justifier votre réponse.

Q39 – Modifier le grafcet de la question 37 en conséquence.

Traitement des obstacles ponctuels

On ajoute un deuxième tachymètre sur l'autre chenille de chaque essieu motorisé. On dispose donc pour l'essieu motorisé de la remorque n de 2 informations de vitesse : V_{mg} (chenille gauche) et V_{md} (chenille droite).

Q40 – Quelle nouvelle situation peut être détectée par l'ajout de ce second tachymètre sur chaque essieu motorisé ?

Q41 – Proposer un mode de contrôle permettant de traiter cette nouvelle situation.

Q42 – Représenter de manière détaillée la séquence de commande correspondant à ce mode de contrôle. (Utiliser le formalisme des figures 15 et 16, en numérotant les étapes sous la forme E_x ($E10$, $E20$ etc.)).

Démarrage du convoi

L'objectif du cahier des charges est de faire atteindre au convoi sa vitesse de croisière au plus en 5 minutes.

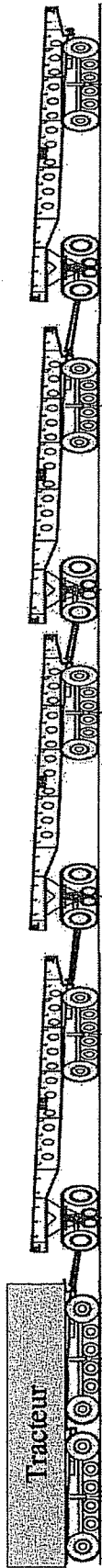
- Q43** – *Quel est l'allure de la consigne de couple que l'on délivre à chaque moteur du convoi pendant cette phase de démarrage ?*
- Q44** – *Que se passe-t-il si un élément du convoi démarre plus vite que le précédent ?*
- Q45** – *Que se passe-t-il si un élément du convoi démarre trop lentement par rapport au précédent ?*
- Q46** – *Proposer un chronogramme représentant la consigne de couple délivrée à chaque élément du convoi pendant la phase de démarrage (On se limitera au tracteur et à 2 remorques).*
- Q47** – *Représenter de manière détaillée la séquence de commande correspondant à cette phase de démarrage. (On se limitera au tracteur et à 2 remorques) (Utiliser le formalisme des figures 15 et 16, en numérotant les étapes sous la forme Dx (D10, D20 etc.)).*

Mode dégradé

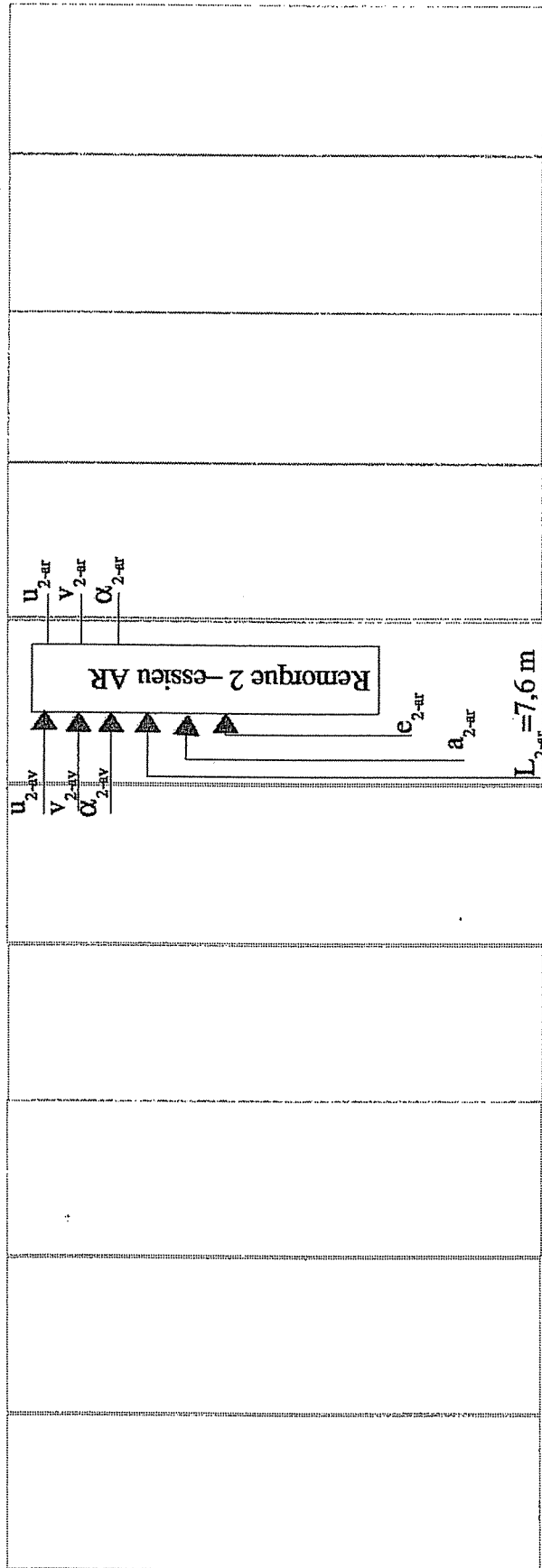
Parfois, la commande automatique du convoi n'est plus possible. C'est le cas par exemple lorsqu'une remorque s'est mise en travers, ou est coincée dans une crevasse.

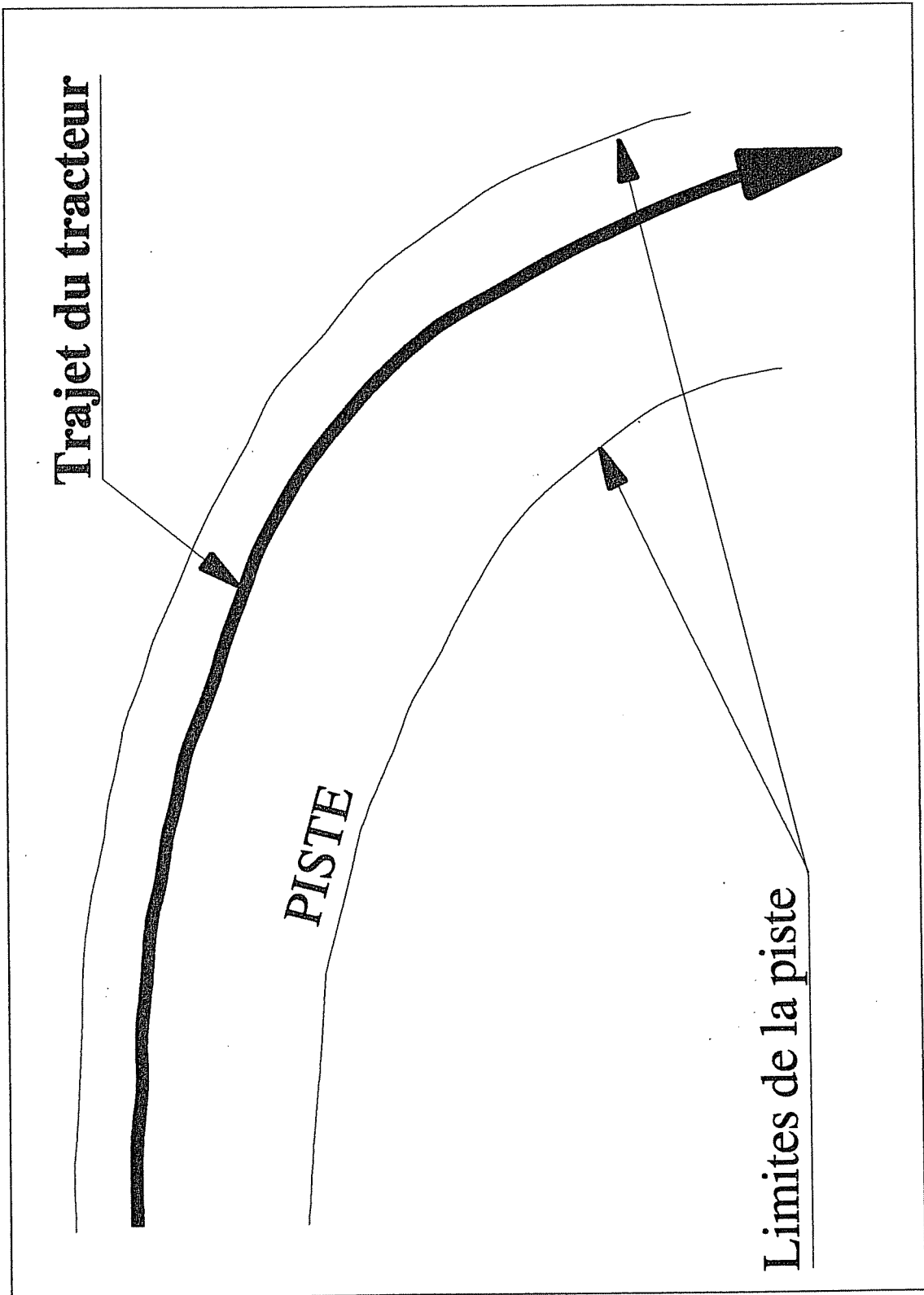
- Q48** – *Proposer un mode de contrôle pour traiter cette situation extrême.*

DOCUMENT RÉPONSE DR1 - Modèle du convoi



Tracteur Remorque 1 Remorque 2 Remorque 3 Remorque 4





DOCUMENT RÉPONSE DR3 – Diagramme bloc-fonctionnel

