

EPREUVE D'AUTOMATIQUE -
INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

**Éléments de corrigé et
commentaires**

Motorisation des remorques sur un convoi polaire

Partie A – Étude de l'architecture du système

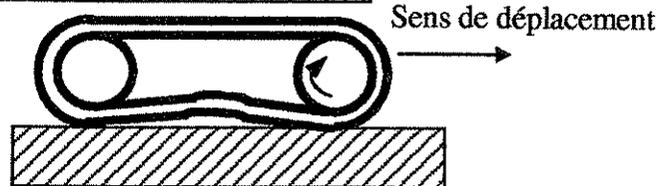
Q 1 – Si cette condition n'est pas respectée, le convoi risque de se désaligner à la moindre perturbation du trajet.

En effet à vitesse stabilisée, les remorques ne respectant pas cette condition sont en équilibre instable.

Q 2 – En implantant le moteur sur le bogie arrière, le brin tendu de la chenille se trouve en contact avec le sol.



En implantant le moteur sur le bogie avant, le brin mou de la chenille se trouve en contact avec le sol.

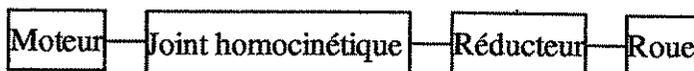


Q 3 – Première architecture de chaîne de transmission avec 1 seul réducteur :



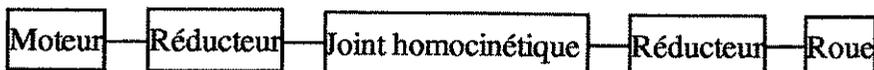
Cette première architecture permet de disposer d'un espace important au centre de l'essieu pour loger le réducteur. Par contre elle conduit à choisir un joint homocinétique de grande dimension car le couple qu'il doit transmettre est important.

Seconde architecture de chaîne de transmission avec 1 seul réducteur :



Cette seconde architecture permet d'utiliser un joint homocinétique de taille plus faible que dans la première solution, car le couple qu'il doit transmettre est moins important. Par contre, l'espace disponible pour loger le réducteur dans la roue est limité par la taille de cette dernière.

Q 4 – Chaîne de transmission retenue (avec 2 réducteurs) :



Cette solution augmente le nombre de composants de la chaîne de transmission, mais permet d'en homogénéiser le poids. Ainsi, on facilite la maintenance de l'ensemble, qui est effectuée sans moyens lourds.

Q 5 – La distance entre le variateur de fréquence et le moteur asynchrone est limitée, car une augmentation de la distance provoque des perturbations du signal électrique.

Partie B – Choix d'une stratégie de pilotage

Q 6 – $\overrightarrow{V}_{(A_n \in (n-1)/R_0)} = \overrightarrow{V}_{(A_n \in (n)/R_0)}$ (relation 0)

Q 7 – En exprimant $\overrightarrow{V}_{(A_n \in (n-1)/R_0)}$ et $\overrightarrow{V}_{(A_n \in (n)/R_0)}$ respectivement en fonction de $\overrightarrow{V}_{(O_{n-1} \in (n-1)/R_0)}$ et $\overrightarrow{V}_{(O_n \in (n)/R_0)}$ dans la relation 0, on écrit :

$$\begin{pmatrix} u_{n-1} \\ v_{n-1} \\ 0 \end{pmatrix} - a_n * \overrightarrow{X}_{n-1} \wedge \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\alpha}_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_n \\ v_n \\ 0 \end{pmatrix} + L_n * \overrightarrow{X}_n \wedge \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\alpha}_n \end{pmatrix} \quad (\text{relation 1})$$

En projetant la relation 1 sur \vec{X} on obtient :

$$u_{n-1} + a_n * \dot{\alpha}_{n-1} * \sin(\alpha_{n-1}) = u_n - L_n * \dot{\alpha}_n * \sin(\alpha_n)$$

Q 8 – En projetant la relation 1 (voir question 7) sur \vec{Y} on obtient :

$$v_{n-1} - a_n * \dot{\alpha}_{n-1} * \cos(\alpha_{n-1}) = v_n + L_n * \dot{\alpha}_n * \cos(\alpha_n)$$

Q 9 – En modélisant le contact chenille/sol par un contact ponctuel situé au centre de la surface de contact chenille/sol, on définit la projection du point de contact de chaque chenille/sol dans le plan de l'axe des roues motrices par C_G et C_D , respectivement pour les chenilles gauche et droite. On a : $\overrightarrow{OC}_{Gn} = e * \vec{Y}_n$ et $\overrightarrow{OC}_{Dn} = -e * \vec{Y}_n$ pour le module n.

La condition de roulement sans glissement pour chaque chenille s'écrit :

$$\overrightarrow{V}_{C_{Gn} \in n/R_0} * \vec{Y}_n = \overrightarrow{V}_{C_{Dn} \in n/R_0} * \vec{Y}_n = \vec{0} \quad (\text{relation 2})$$

Q 10 – En développant la relation 2 (voir question 9) et en utilisant le résultat des questions 7 et 8 on obtient :

$$\dot{\alpha}_n = -\frac{a_n}{L_n} * \dot{\alpha}_{n-1} * \cos(\alpha_n - \alpha_{n-1}) - \frac{u_{n-1}}{L_n} * \sin(\alpha_n) + \frac{v_{n-1}}{L_n} * \cos(\alpha_n)$$

Q 11 – Le résultat de la question 7 nous donne :

$$u_n = u_{n-1} + a_n * \dot{\alpha}_{n-1} * \sin(\alpha_{n-1}) + L_n * \dot{\alpha}_n * \sin(\alpha_n)$$

Q 12 – Le résultat de la question 10 nous donne :

$$v_n = v_{n-1} - a_n * \dot{\alpha}_{n-1} * \cos(\alpha_{n-1}) - L_n * \dot{\alpha}_n * \cos(\alpha_n)$$

Q 13 – Voir document réponse DR1. Pas de difficultés particulières. A noter :

- $L_n = 0$ pour le premier timon du tracteur,
- on peut placer un $\alpha_{initial} = 20^\circ$ en entrée du 1er timon du tracteur,
- timon avant et timon arrière de longueurs différentes sur une remorque.

Q 14 – Voir document réponse DR1. Pas de difficultés particulières. Prélever les vitesses sur les essieux arrières des remorques, car ce sont ceux qui sont motorisés.

Q 15 – Voir document réponse DR2. Pas de difficultés particulières. On observe sur la simulation que $\int v_n dt$ décroît au fur et à mesure que n augmente. Par conséquent, plus la remorque est loin du tracteur, moins elle parcourt de distance. Aussi, comme le convoi se reforme en sortie de virage, les remorques « coupent » le virage de plus en plus lorsque le rang de la remorque dans le convoi augmente.

Q 16 – Avec les éléments fournis dans le sujet, cette stratégie est envisageable, car la vitesse de chaque remorque est connue.

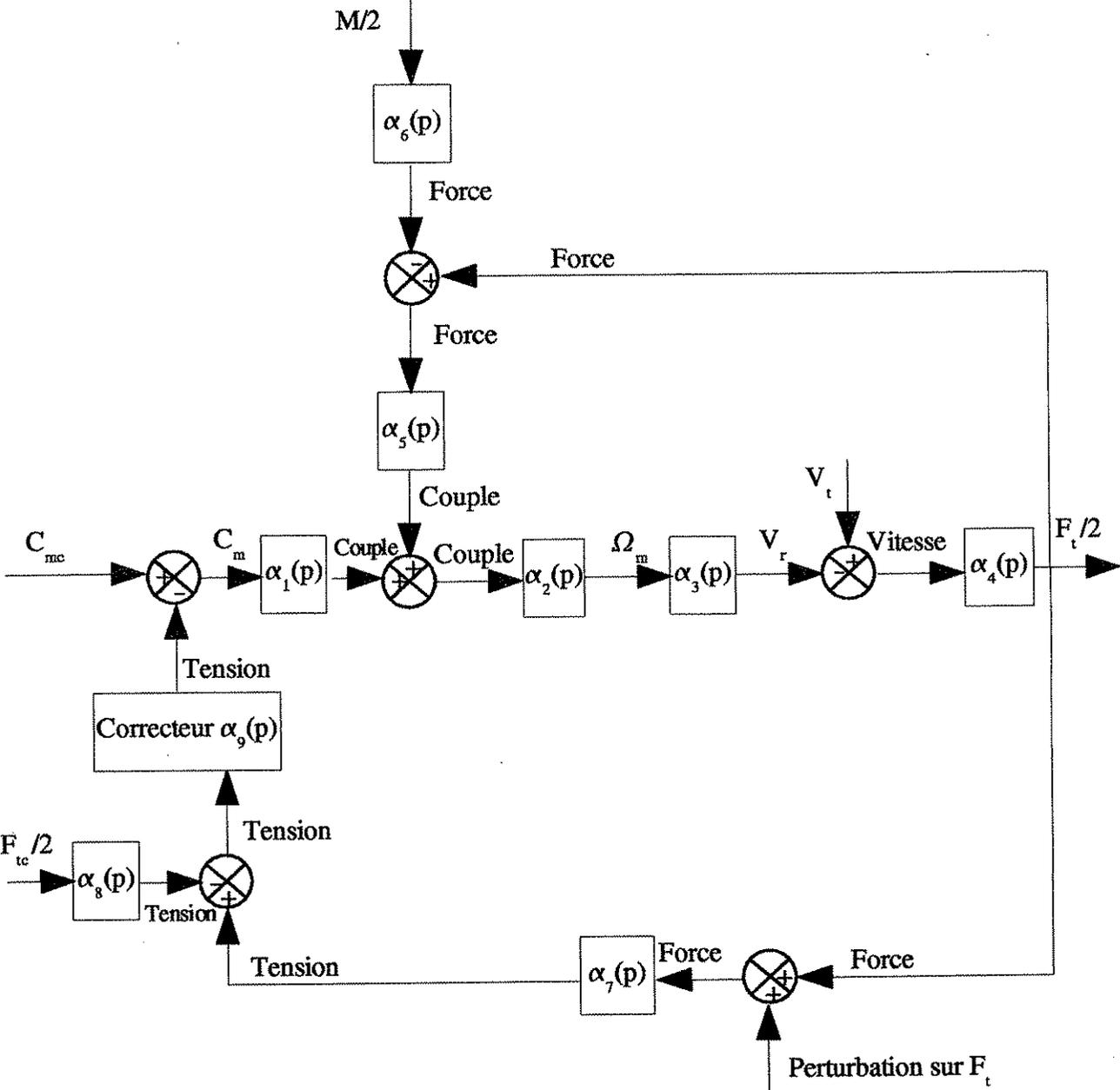
Remarque : dans le système réel, le décalage de fréquence de commande correspondant au décalage de couple entre 2 remorques successives est inférieur à l'erreur d'un variateur, ce qui empêche d'appliquer effectivement cette stratégie.

Q 17 – Cette stratégie n'est pas envisageable, car pour l'appliquer il est nécessaire de connaître a priori la vitesse de chaque remorque à chaque instant du trajet. Or les hypothèses utilisées pour construire le modèle sont trop simples pour représenter la réalité de manière fiable, notamment au niveau du contact chenille/sol.

Q 18 – Cette stratégie n'est pas envisageable, car on ne connaît pas a priori la vitesse de chaque remorque.

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

Q 19 – Grandeurs physiques dans le diagramme bloc :



Q 20 – En utilisant le théorème de l'énergie cinétique :

$$\frac{dE_c}{dt} = (\text{Puissance efforts extérieurs}) - (\text{Puissance efforts intérieurs})$$

On obtient :

$$\dot{\Omega}_m = \frac{\eta \cdot C_m - (F_t + K_s \frac{M \cdot g}{2})}{J_{e.p}}$$

Q 21 – En exprimant le résultat de la question 20 dans le domaine de Laplace, on obtient les fonctions de transfert suivantes :

$$\alpha_1 = \eta$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{J_e \cdot p}$$

$$\alpha_3 = \frac{D}{2r}$$

$$\alpha_4 = \frac{K_t}{p} \quad \text{En effet, la variation de la distance entre le tracteur et la remorque à l'instant } t, \text{ et cette distance à l'instant } t = 0 \text{ est égale à}$$

$$\int_0^t (V_t - V_r) dt . \text{ Par conséquent l'effort } F_t \text{ induit par cette}$$

$$\text{variation de longueur du timon est : } K_t * \int_0^t (V_t - V_r) dt$$

$$\alpha_5 = \frac{D}{2r}$$

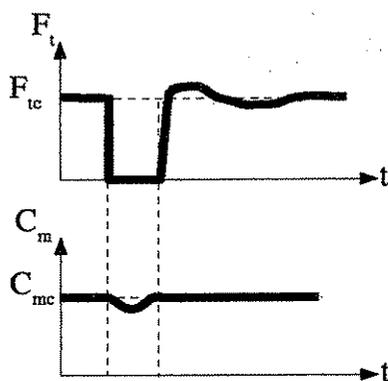
$$\alpha_6 = \frac{K_s \cdot g}{2}$$

Q 22 – Par souci d'homogénéité : $\alpha_7 = \alpha_8 = K_c$

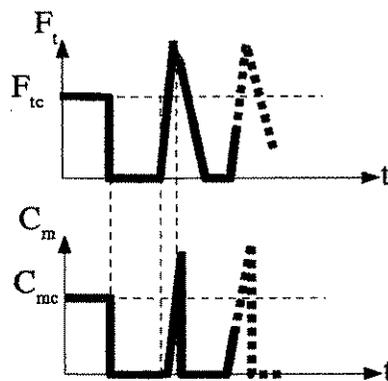
Q 23 – C'est l'hypothèse de linéarité du modèle retenu du système qui justifie cette démarche de travail. Son intérêt est d'étudier un ensemble de réponses simples à des sollicitations simples, pour composer des réponses complexes à des entrées complexes combinaisons linéaires des entrées simples.

Q 24 – Ce cas d'étude est induit par la première conséquence de la présence de jeu dans l'anneau du timon, qui entraîne des ruptures du contact tracteur / timon de la remorque.

Q 25 – Réponse souhaitée : il faut diminuer la consigne de couple sur le moteur de la remorque, pour ralentir celle-ci et rétablir le contact avec le tracteur. La diminution de couple doit être progressive et modérée, pour minimiser la vitesse relative tracteur/remorque lors du rétablissement du contact. En effet, une vitesse relative trop importante entraîne un pic d'effort mesuré par le capteur, qui entraînera à son tour une réaction de la remorque pouvant à nouveau provoquer une rupture de contact. Le phénomène peut alors continuer à se reproduire. C'est la réponse à éviter.



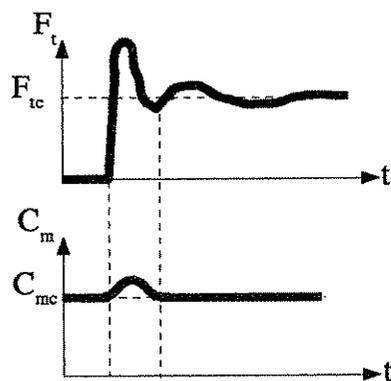
Comportement souhaité



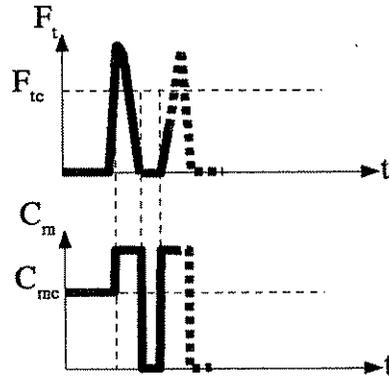
Comportement à éviter

Q 26 – Ce cas d'étude est induit par la seconde conséquence de la présence de jeu dans l'anneau du timon, qui entraîne des pics d'efforts mesurés par le capteur placé dans l'anneau du timon au moment du contact tracteur/timon de la remorque.

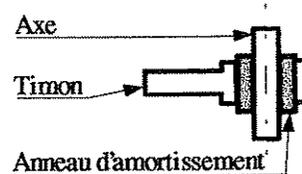
Q 27 – Réponse souhaitée : il faut augmenter la consigne de couple sur le moteur de la remorque, pour accélérer celle-ci et réduire l'effort sur le timon. L'augmentation de couple doit être progressive et modérée, pour soulager le tracteur sans rompre le contact tracteur/remorque. En effet, une augmentation de couple trop brutale sur la remorque entraînerait une augmentation de la vitesse de la remorque qui pourrait à nouveau provoquer une rupture de contact. Le phénomène pourrait alors se reproduire. C'est la réponse à éviter.



Comportement souhaité



Comportement à éviter



Q 28 – Solution 1 : filtrage « mécanique » par insertion d'un anneau d'amortissement entre l'axe et le timon.

Solution 2 : filtrage « électronique » du signal transmis par le capteur de force situé dans l'anneau du timon. On peut par exemple définir des seuils haut et bas pour ce signal, ou utiliser la valeur moyenne de la période précédente sur une durée donnée.

Q 29 – Solution 1 (mécanique) : modification de α_4 par ajout d'un coefficient d'amortissement.

Solution 2 (électronique) : ajout d'un bloc de filtrage après α_7 .

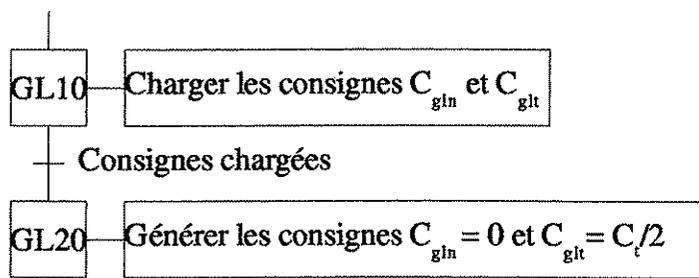
Q 30 – La caractéristique intégrale (pour favoriser la stabilité du système). La stabilité est en effet plus importante pour ce système que le temps de réponse ou la précision, car les écarts de comportement se propagent dans le convoi. Cette instabilité entraîne un effet de pompage dont les chocs successifs conduisent à des casses matérielles qui posent problème dans l'environnement de travail du convoi.

Q 31 – La limitation de la valeur du 1^{er} dépassement sur F_t dans une réponse à 1 échelon.

Partie D – Étude des modes de contrôle

Q 32 – Ne plus commander les remorques : $C_{gl1}=C_{gl2}=C_{gl3}=C_{gl4}=0$ et réduire la puissance fournie par le tracteur en la divisant par exemple par 2 : $C_{gt}=\frac{C_t}{2}$, car la position relative des remorques n'est plus connue et il est impératif de réduire la vitesse du convoi pour en reprendre le contrôle.

Q 33 –



Q 34 – Condition 34 : (Tous les écarts de vitesse entre 2 éléments consécutifs du convoi sont inférieurs à 0,5%)

$$\text{Autre formulation : pour } i \in \{1,2,3,4\}, \left(\text{Max} \frac{v_i - v_{i-1}}{v_i} < 0,005 \right) \text{ (condition 34)}$$

Théoriquement cette condition est constituée par l'égalité parfaite des vitesses, mais dans la pratique les informations des tachymètres ne sont jamais parfaitement égales. Aussi, il est nécessaire de définir un « seuil » d'égalité, par exemple 0,5%.

Q 35 – Condition 35 :

(\exists au moins un écart de vitesse entre 2 éléments consécutifs du convoi $> 0,5\%$)

ET

(\nexists d'écart de vitesse entre 2 éléments consécutifs du convoi $> 2\%$)

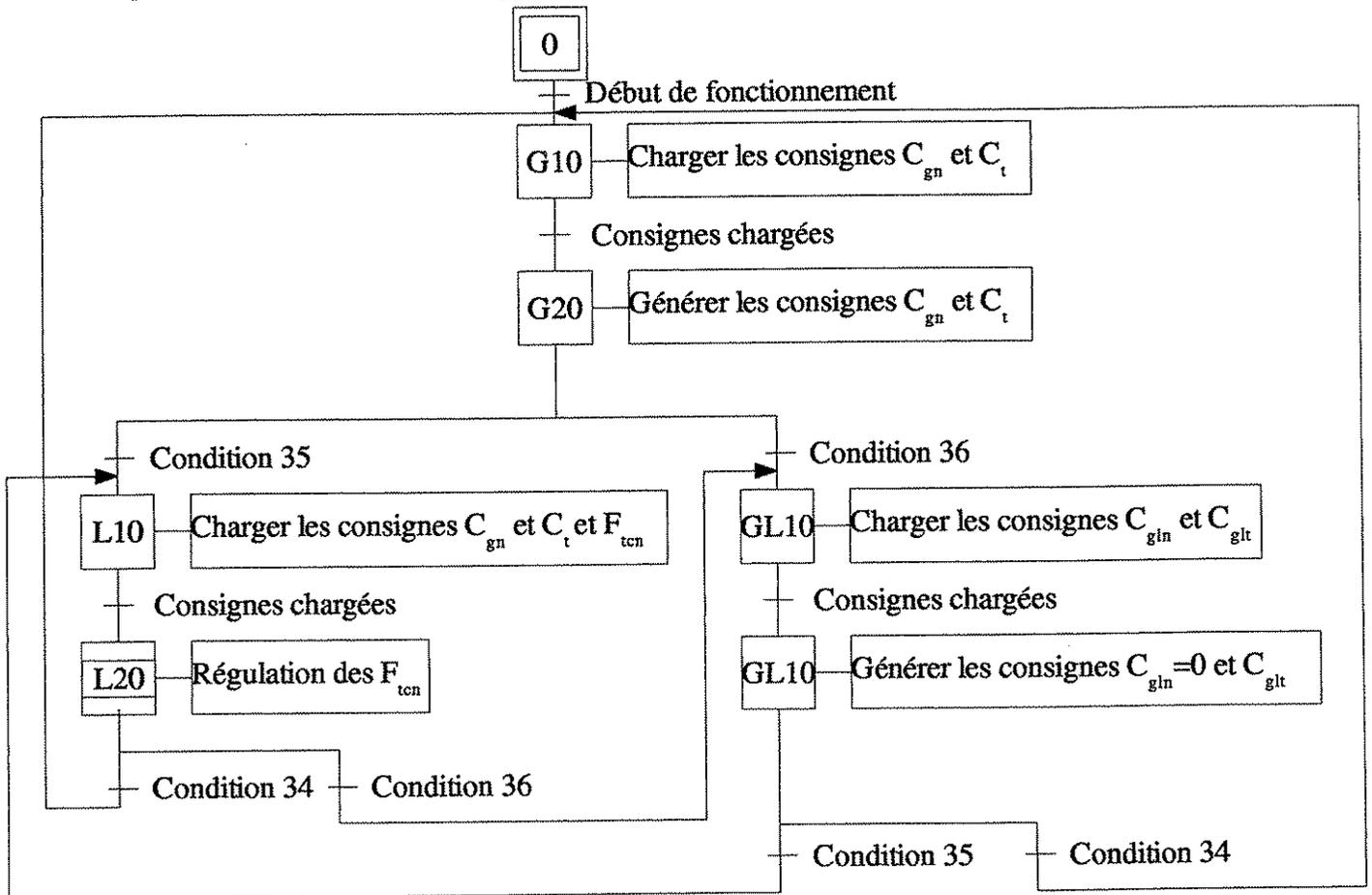
$$\text{Autre formulation : pour } i \in \{1,2,3,4\}, \left[\left(\text{Max} \frac{v_i - v_{i-1}}{v_i} > 0,005 \right) \text{ ET } \left(\text{Max} \frac{v_i - v_{i-1}}{v_i} < 0,02 \right) \right] \text{ (condition 35)}$$

Q 36 – Condition 36 :

(\exists au moins un écart de vitesse entre 2 éléments consécutifs du convoi $\geq 2\%$)

$$\text{Autre formulation : pour } i \in \{1,2,3,4\}, \left(\text{Max} \frac{v_i - v_{i-1}}{v_i} \geq 0,02 \right) \text{ (condition 36)}$$

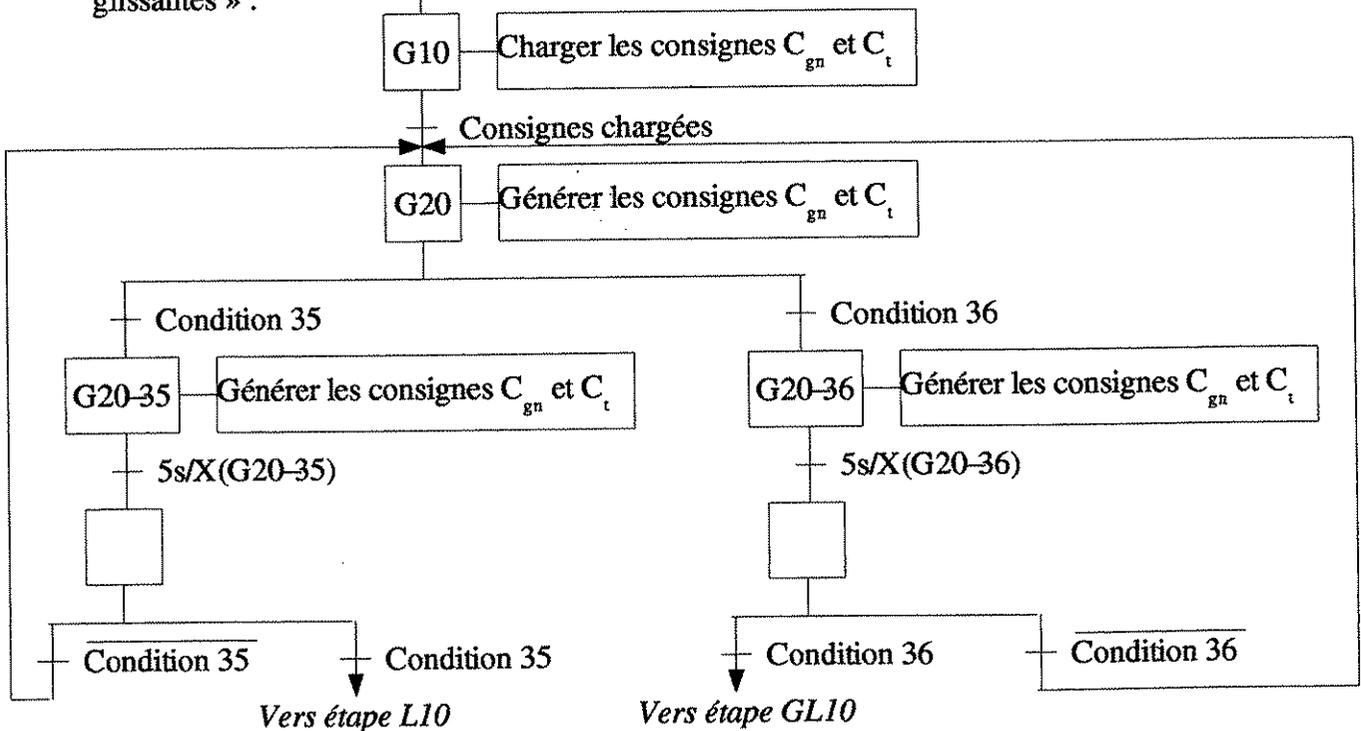
Q 37 – Grafcet reliant les 3 séquences :



Q 38 – Il n'est pas souhaitable de changer de mode dès qu'une des conditions 34, 35 ou 36 est vraie, car des changements de mode incessants nuisent à la stabilité du convoi.

Q 39 – Par conséquent, nous proposons de changer de mode de commande 5 secondes après la détection de la condition de changement, et si cette condition est toujours vraie.

Exemple de modification du grafcet pour quitter le mode de commande « remorques glissantes » :

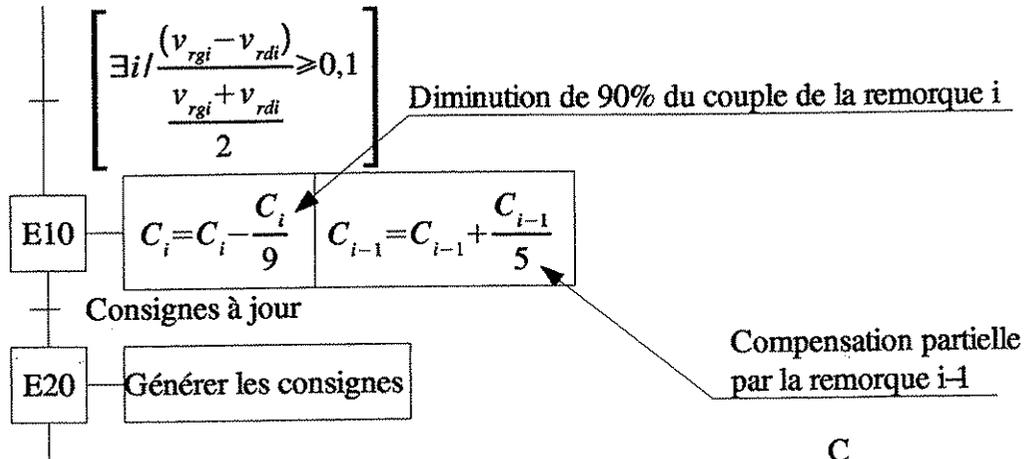


Q 40 – On peut désormais détecter le patinage d'une chenille.

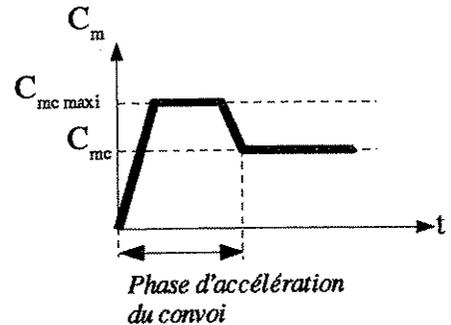
Q 41 – Mode de contrôle proposé lors du patinage des chenilles d'une remorque :

- Diminuer le couple délivré par le moteur de la remorque qui patine,
- Augmenter le couple délivré par le moteur de la remorque qui la précède (pour compenser).

Q 42 –



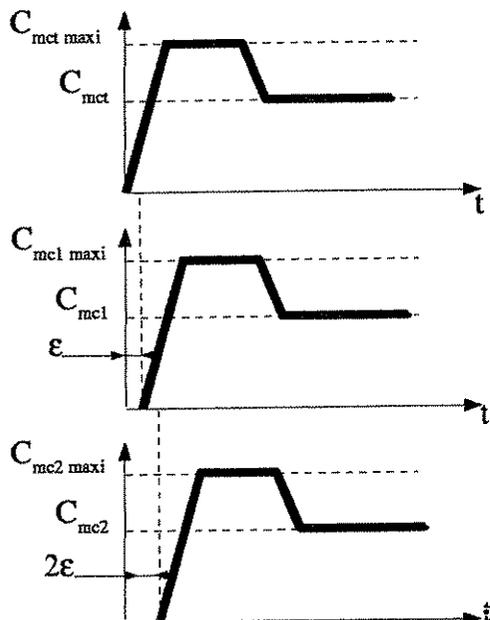
Q 43 – Pour obtenir un profil classique de vitesse en trapèze pour le convoi, le couple moteur délivré par chaque moteur est théoriquement constant pendant la phase de démarrage. Cependant, comme le convoi évolue sur la glace, on va délivrer un profil de couple en trapèze en démarrage pour adoucir cette phase de démarrage.



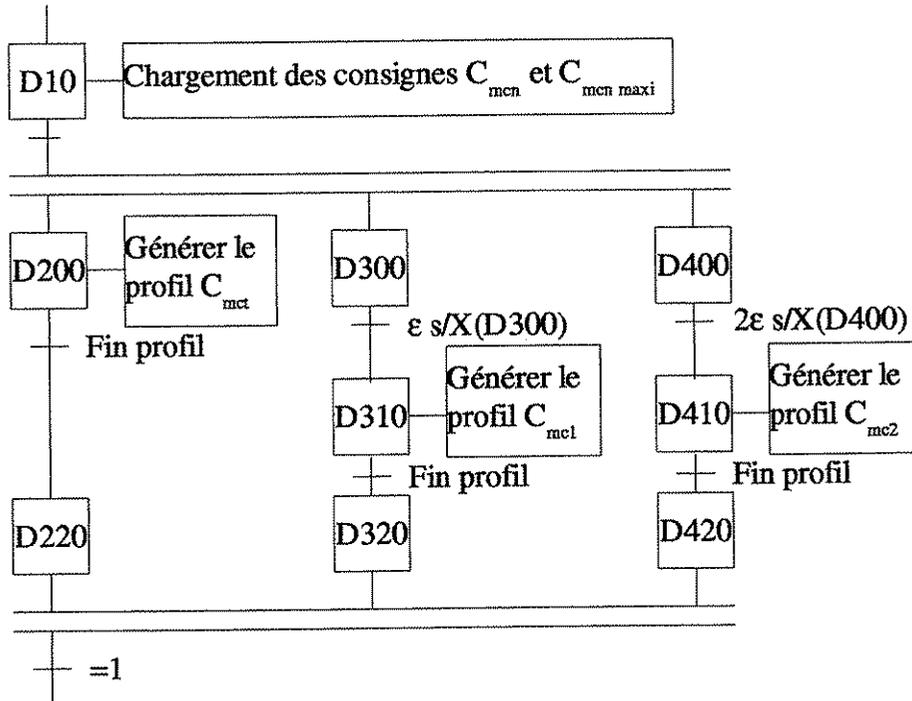
Q 44 – Cet élément pousse le précédent, et le convoi se désaligne.

Q 45 – L'élément précédent risque de patiner.

Q 46 – On retarde progressivement l'affichage des consignes en avançant dans le convoi.

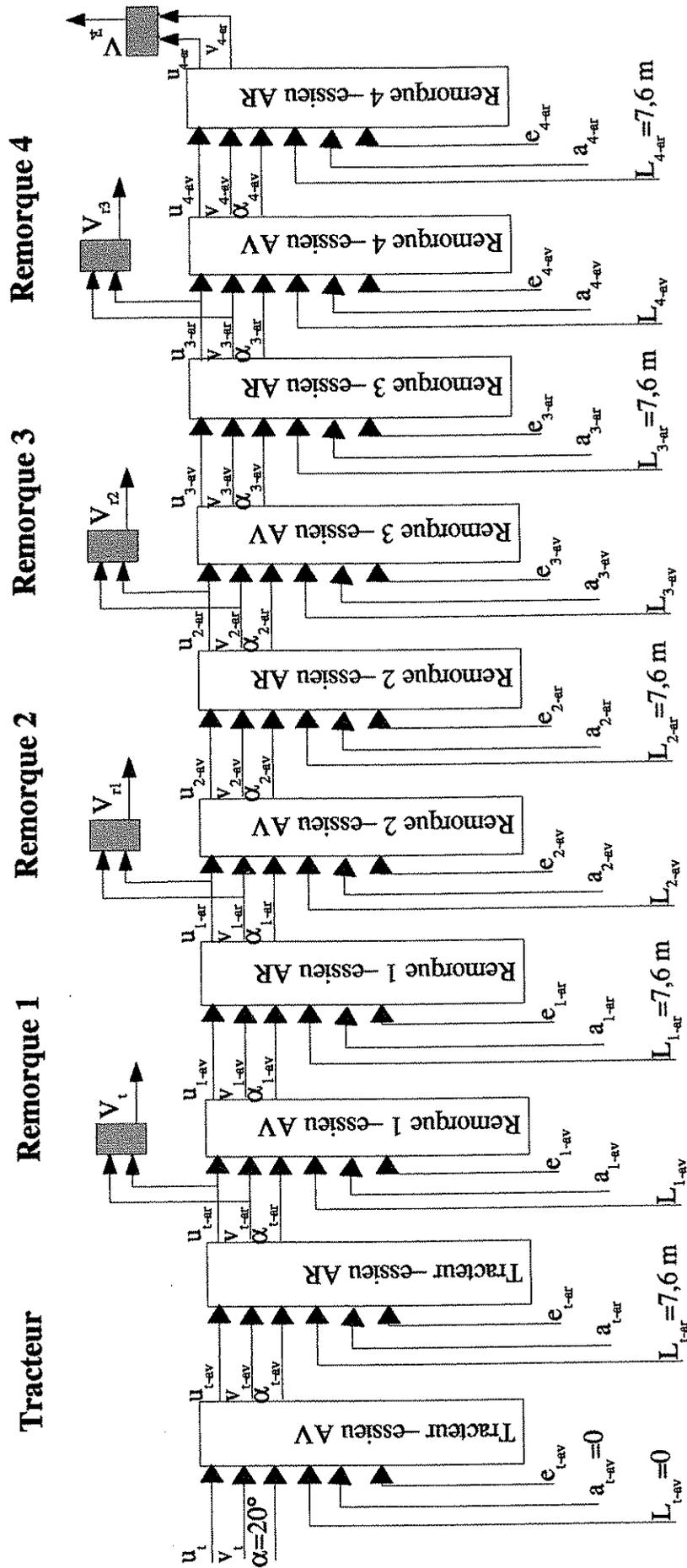


Q 47 -

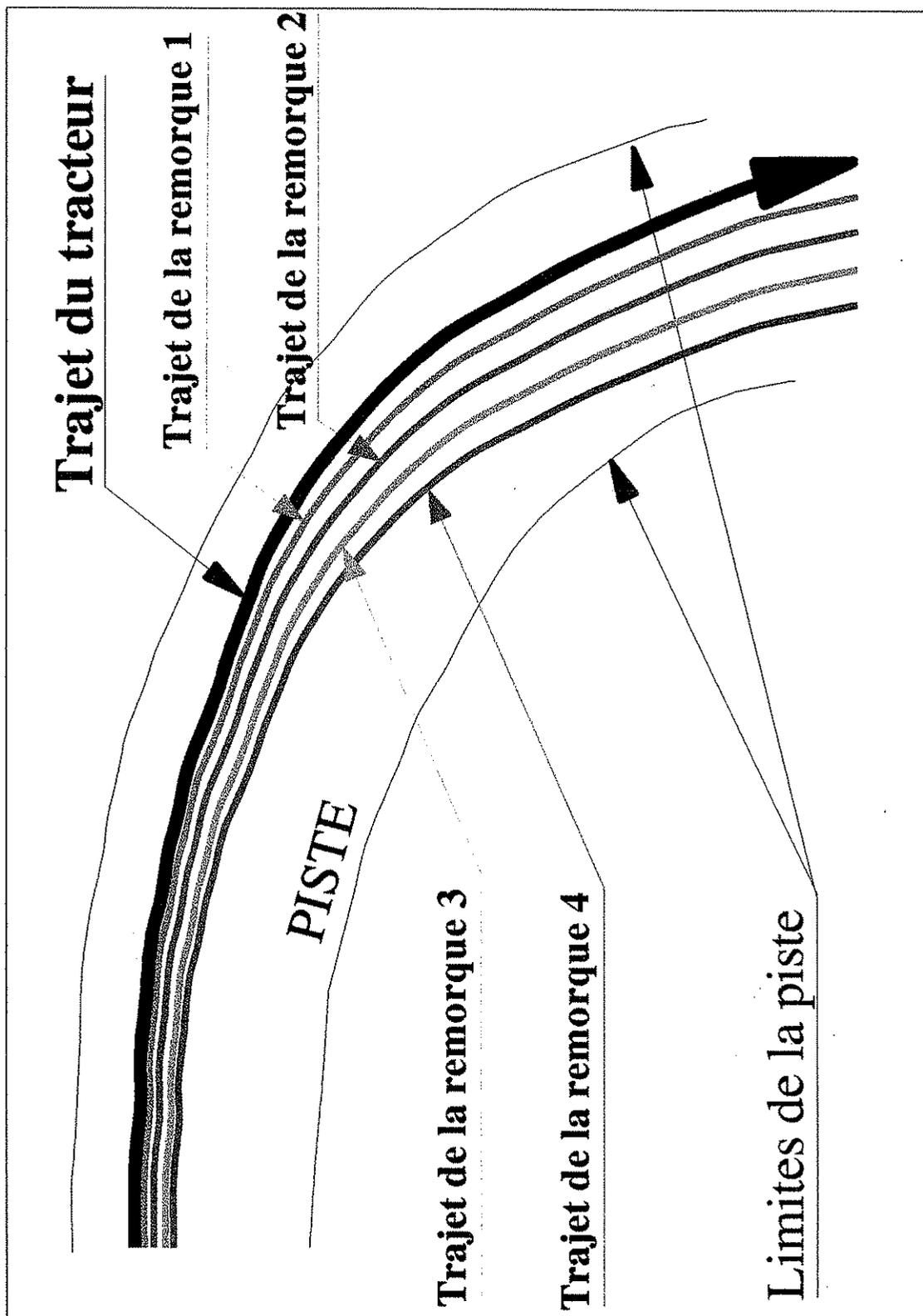


Q 48 - Affichage manuel des consignes par le conducteur.

DOCUMENT RÉPONSE DR1 – Modèle du convoi



: Réponse à la question 14



Commentaires sur l'épreuve d'Automatique – Informatique Industrielle

Partie A – Étude de l'architecture du système

Cette partie permettait de faire rentrer progressivement le candidat dans le problème et de vérifier que l'architecture du système était bien comprise. Les réponses sont d'une manière générale trop longues et pas assez précises.

Q 1 – Cette question a été traitée par presque tous les candidats. La justification de la condition a presque toujours été comprise intuitivement, mais parfois justifiée trop longuement et pas assez précisément (pas de référence à l'équilibre instable, pas de schéma).

Q 2 – Cette question a été traitée par presque tous les candidats.

1/3 des candidats ont justifié correctement l'implantation du moteur sur le bogie arrière.

1/3 des candidats expliquent la localisation du moteur par analogie avec les voitures de type "propulsion" : le transfert de masse à l'accélération augmente l'effort transmissible par le bogie arrière de l'essieu. Compte tenu des accélérations en jeu et du fait que les bogies avant et arrière de l'essieu sont reliés par une chenille, cette explication n'est pas valable.

Enfin 1/3 des candidats justifient l'implantation de la motorisation sur l'essieu arrière, par rapport à une implantation sur l'essieu avant. Ce n'était pas la question.

Q 3 – Cette question a été traitée par 2/3 des candidats.

1/3 des candidats la traitent correctement, tout en noyant les caractéristiques qui différencient les 2 solutions dans le cadre de ce problème (encombrement, taille des composants) parmi d'autres caractéristiques (rendement, irréversibilité, coût, voir esthétique !) non décisives pour ce problème. Il n'est pas demandé au candidat d'être simplement capable de lister des caractéristiques générales, mais d'être capable de sélectionner parmi ces caractéristiques générales celles qui différencient des solutions dans le cadre d'un problème particulier.

1/3 des candidats n'identifient qu'une seule chaîne de transmission et la compare à la solution retenue (avec 2 réducteurs).

1/3 des candidats ne traitent pas cette question.

Q 4 – Cette question a été traitée par 50% des candidats. A 2 exceptions près, les candidats n'ont pas fait le lien entre cette architecture et les conditions de maintenance

(pas de moyens lourds).

Q 5 – Cette question a été traitée par 80% des candidats.

15% des candidats identifient le phénomène d'apparition de perturbations électriques lorsqu'on augmente la longueur de fil.

40% des candidats placent le problème sur le plan thermique :

- "agression" mécanique du froid sur les fils (fragilisation du câble),
- "perturbations électriques " dues au froid (pourquoi ?),
- moteur chauffant le variateur ou variateur chauffant le moteur si les 2 composants sont proches (mais au départ les 2 sont froids !).

Les candidats évoquent une justification, mais ne l'expliquent pas. Ils identifient correctement les risques liés à l'environnement du système (température, perturbations électromagnétiques, chocs sur les câbles) puis tranchent, sans expliquer leur choix. En cherchant à expliquer pourquoi la justification qu'ils retiennent est pertinente, ils affinaient probablement leur raisonnement.

25% des candidats pensent que c'est la torsion de l'arbre de transmission entre le variateur de fréquence et le moteur électrique qui justifie le fait que ces 2 composants soient proches ! Ceci traduit une méconnaissance totale des principes de commande des moteurs asynchrones.

20% des candidats ne traitent pas cette question.

Partie B – Choix d'une stratégie de pilotage

Cette partie permettait de préparer puis d'exploiter une simulation de cinématique du convoi, pour justifier la conception d'une commande asservie.

Q 6 – Cette question a été traitée correctement par presque tous les candidats. Cependant, plutôt que d'écrire directement la condition, 1/3 des candidats choisissent d'écrire une chaîne fermée passant par ce point, puis la dérivent par rapport au temps. C'est correct, mais long pour ce problème.

Q 7 – Cette question a été traitée correctement par presque tous les candidats.

Q 8 – Cette question a été traitée correctement par presque tous les candidats.

Q 9 – Cette question a été traitée par 30% des candidats.

5% seulement des candidats ont traité correctement le problème, en plaçant un C.I.R du mouvement du module par rapport au sol sur l'axe \vec{Y} .

25% des candidats ont écrit que la vitesse relative chenille/sol était nulle au point de contact. Il n'ont pas été plus loin et n'en ont pas déduit que la vitesse de la remorque au niveau de l'axe des roues des bogies était portée par Y. Certains ont au contraire imposé une vitesse égale à droite et à gauche. Les candidats doivent être capables d'exploiter de manière pertinente une condition générale sur un cas particulier.

70% des candidats n'ont pas traité cette question.

Q 10, Q 11 et Q 12 – Ces questions n'ont été traitées que par 5 candidats.

Q 13 – Cette question a été traitée correctement par presque tous les candidats. Pas de difficultés majeures.

Q 14 – Cette question n'a été traitée que par 30% des candidats. Certains ont choisi de prélever les vitesses sur l'essieu avant des remorques. Ce n'est pas judicieux, puisque c'est l'essieu arrière qui est commandé.

Q 15 – Cette question a été traitée correctement par presque tous les candidats. Pas de difficultés majeures.

Q 16, Q 17 et Q 18 – La plupart des candidats ont répondu à ces questions sans justifications. Ceci s'explique parce qu'à quelques exceptions près, le fait de devoir connaître a priori la vitesse de chaque remorque pour pouvoir appliquer la stratégie proposée n'a pas été vu.

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

Cette partie, désormais classique, s'intéresse à la modélisation d'un comportement pluri technique à dominante mécanique sous forme de schéma bloc.

Les bases de ce type d'activité que sont :

- les équations différentielles de comportement,
- les chaînes d'information et d'énergie qui traversent le système étudié,

sont méconnues des candidats.

Le jury rappelle que cette modélisation est le préalable à tout traitement informatique de comportement.

De plus, le jury relève que :

- les différences entre grandeurs physiques et informationnelles sont inconnues,
- trop peu de candidats maîtrisent et formulent les hypothèses qui doivent être faites pour écrire certaines équations,
- trop d'erreurs d'homogénéité flagrantes sont commises.

Enfin, les notions de fonctions de transfert et de variables manipulées sont trop souvent mêlées.

Cependant le jury note que cette partie a été traitée par la majorité des candidats et que quelques copies sont de très bonne facture.

Partie D – Étude des modes de contrôle

Un tiers des candidats n'ont pas abordé cette partie. Il faut cependant rappeler que les quatre parties sont indépendantes et que rien n'oblige les candidats à composer dans l'ordre de numérotation des parties.

Pour les candidats ayant abordé cette partie, quelques remarques sur les résultats :

Q 32 et Q 33 – Les candidats ont tous cherché à répondre à ces deux questions liées. Les commandes à générer n'ont pas été trouvées et les réponses sont partielles. Aucun candidat n'a pu donner une réponse complète et exacte.

Q 34 – Un seul candidat a pensé à définir un seuil proche de 0%.

Q 35 et Q 36 – Bien que souvent mal exprimées, les conditions demandées sont généralement comprises.

Q 37 – Une grande diversité de réponse à cette question. Quelques grafkets sont justes et traduisent bien les conditions exprimées précédemment.

Q 38 – Les réponses sont majoritairement exactes et la justification est bonne. La nécessité d'une temporisation est souvent exprimée.

Q 39 – La formalisation sous forme de grafket est souvent laborieuse et nombreux grafkets présentent des erreurs de syntaxe grossières.

Q 40 – La détection du patinage est souvent donnée.

Q 41 – Bien que les réponses à la question précédente soient souvent correctes, le traitement du problème de patinage n'est généralement pas compris ou seulement partiellement.

Q 42, Q 43, Q 44, Q 45, Q 46, Q 47 et Q 48 – Questions quasiment pas abordées.

moyenne : 7,76

