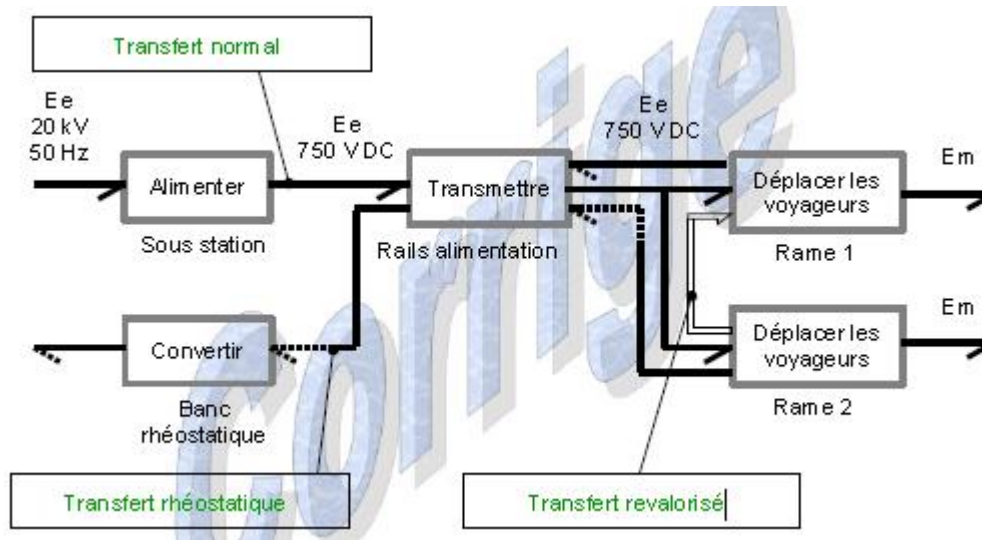


Méto de Rennes- Corrigé

2. Optimisation des temps séparant les rames successives

Objectif de cette partie : vérifier qu'un choix judicieux des intervalles entre rames est une solution à la réduction de la consommation énergétique du metro.

Q1. Sur le document réponse DR1 page 25, **indiquer** dans les cadres les types de transfert d'énergie (normal, rhéostatique, revalorisé) en vous basant sur les définitions précédentes.



0	Réponse totalement fausse ou non traitée
1	Une réponse exacte
2	Deux réponses exactes
3	Réponse complète

Q2. A l'aide du DT1 page 20, pour le mode de fonctionnement 1, **indiquer** si la rame 1 consomme de l'énergie ou si elle en restitue pour les intervalles de temps [5 s ; 35 s] et [35 s ; 52 s].

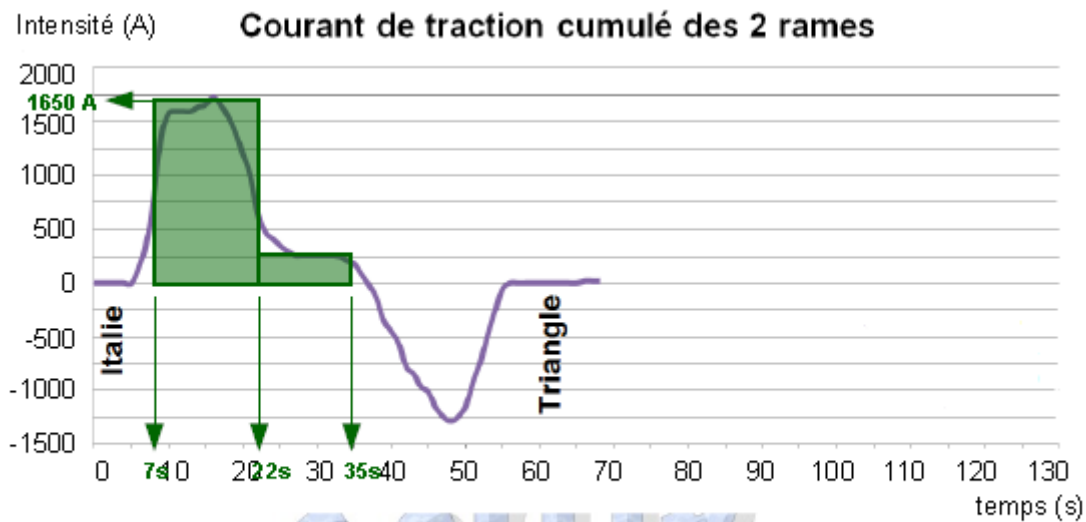
– Intervalle [5s ; 35s] → Rame 1 consommant de l'énergie

– Intervalle [35s ; 52s] → Rame 1 restituant de l'énergie

0	Réponse totalement fausse ou non traitée
1	Une réponse exacte
2	
3	Réponse complète

Q3. A partir du document DR2 (issu du DT1) page 25, **estimer** de manière approchée, l'énergie fournie par le réseau (en W·h) aux 2 rames entre les stations *Italie* et *Triangle* lors du mode de fonctionnement 1. Faire apparaître sur le document DR2 les traces qui permettent de réaliser cette estimation.

– L' énergie approximative consommée par les 2 rames lors du mode de fonctionnement l'essai 1 est de :



$$E_1 = U \cdot \int i(t) \cdot dt = 750 \cdot \frac{[1650 \times (22 - 7) + 250 \cdot (35 - 22)]}{3600} = 5833 \text{ W}\cdot\text{h}$$

0	Réponse totalement fausse ou non traitée
1	Graphique présent et résultat non cohérent Ou Calcul cohérent mais surface erronée
2	Graphique présent et résultat imprécis
3	Réponse complète (estimation + justificatifs)

Q4. A l'aide du DT1, **expliquer** pourquoi le courant de traction cumule obtenu lors du mode de fonctionnement 2 est d'amplitude plus faible que celui obtenu lors du mode de fonctionnement 1.

Le courant de traction cumule est d'amplitude moins importante dans le mode de fonctionnement 2 car l'essai a été réalisé en synchronisant une rame en phase d'accélération avec une rame en phase de freinage. L' énergie de freinage est donc réinjectée vers la rame accélérant.

Lors de l'essai 1, deux rames accélèrent et freinent aux mêmes moments.

0	Réponse totalement fausse ou non traitée
1	Une réponse incomplète (synchronisation)
2	
3	Réponse complète (explication des échanges énergétiques)

Q5. Déterminer le pourcentage d'énergie non consommée dans le mode de fonctionnement 2 par rapport au mode de fonctionnement 1.

Le pourcentage d'énergie potentiellement récupérable par le mode de fonctionnement 2 est de :

$$\text{Energie récupérable} = \frac{(2E_1 - E_2)}{2E_1} \times 100 = \frac{(2 \times 5833 - 2800)}{2 \times 5833} \times 100 = 52\% \quad 76\%$$

0	Réponse totalement fausse ou non traitée
1	Une fois E1 et résultat faux
2	Une fois E1 et résultat juste ou deux fois E1 et résultat faux
3	Deux fois E1 et résultat juste par rapport à la question Q 3

Q6. Citer la plage de temps permettant un fonctionnement à sept rames avec une énergie de freinage perdue inférieure à 30 %.

La plage de temps est celle où le pourcentage d'énergie perdue est inférieur à 30 % soit de 305s à 345s.

0	Réponse totalement fausse ou non traitée
1	
2	
3	Réponse complète (entre 295 et 350)

Q7. A l'aide de la figure 3, **expliquer** pourquoi ce mode d'insertion des rames sur la ligne a une incidence sur l'énergie perdue. **Critiquer** la valeur obtenue à la question Q5 pour le pourcentage d'énergie non consommée.

Le mode d'insertion d'une rame sur la ligne impose de devoir passer par des intervalles peu intéressants énergétiquement. Pour passer de sept à neuf rames, la figure 3 montre que le passage temporaire à huit rames génère des pertes d'énergie supplémentaires. Le pourcentage d'énergie potentiellement récupérable trouvé à la question Q5 est donc très optimiste car il a été obtenu avec deux rames en circulation parfaitement synchronisées.

0	Réponse totalement fausse ou non traitée
1	
2	Réponse partielle (explication ou critique)
3	Réponse complète (explication + critique)

3. Rattrapage d'un retard généré par un incident mineur

Objectif de cette partie : proposer une solution pour rattraper le retard engendré par un incident mineur afin de respecter l'intervalle prévu ?

Q8. A partir de la loi de vitesse $V=f(t)$ (figure 4), **calculer** la distance x parcourue entre les instants 0 s (départ station Ponchaillou) et 54,5 s (arrivée station Villejean Université).

$x(t) = \int v(t) \cdot dt$, graphiquement, la surface située sous la courbe de vitesse $V(t)$ représente le déplacement.

$$x = \frac{17 \times 16}{2} + (37,5 - 17) \times 16 + \frac{(54,5 - 37,5) \times 16}{2} = 600 \text{ m}$$

AUTRE METHODE DE RESOLUTION :

Phase 1 : Phase d'accélération

L'accélération a_1 vaut : $a_1 = \frac{v_1 - v_0}{t_1 - t_0} = \frac{16}{17} = 0,941 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

Le déplacement x_1 est égal à : $x_1 = \frac{1}{2} \cdot a_1 \cdot (t_1 - t_0)^2 = \frac{0,941}{2} \times 17^2 = 136 \text{ m}$

Phase 2 : Phase à vitesse constante

Le déplacement effectué durant la phase 2 x_2 est égal à :

$$x_2 = v_2 \cdot (t_2 - t_1) = 16 \times (37,5 - 17) = 328 \text{ m}$$

Phase 3 : Phase de freinage

$$x_3 = x_3$$

Distance totale parcourue : $x = 600 \text{ m}$

0	Réponse totalement fautive ou non traitée ou si pas de calcul
1	Principe de calcul exact sans calcul
2	Principe exact mais erreur de calcul
3	Réponse complète

Q9. Déterminer le temps t_{deg} mis par la rame pour effectuer le déplacement de 600 m (distance séparant les deux stations) en mode « dégrade ».

Le temps t_1 de la phase d'accélération est : $t_1 = \frac{V_{max}}{a_1} = \frac{23,8}{0,941} = 25,3 \text{ s}$

Le temps total t_{deg} est : $t_{deg} = 2 \cdot t_1 = 50,6 \text{ s}$

0	Réponse totalement fautive ou non traitée
1	Principe de calcul exact sans calcul ou calcul uniquement de t_1 avec unité
2	Principe exact mais erreur de calcul ou sans unité
3	Réponse complète avec unité

Q10. Conclure sur le gain de temps réalisable et sur le nombre d'inter-stations à parcourir pour récupérer un retard de 22 secondes en faisant l'hypothèse simplificatrice que les stations sont équidistantes et que les profils de vitesse sont identiques entre stations.

Le gain de temps réalisable sur 1 inter-station est de $\Delta t = 54,5 - 50,6 = 3,9$ s

Il faut donc 6 inter-stations ($6 \times 3,9 = 23,4$ s) pour rattraper un retard de 22 s.

0	Réponse totalement fausse ou non traitée
1	Principe de calcul exact mais valeurs erronées
2	Intervalle de temps exact mais nombre d'inter-stations faux (mauvais ou pas d'arrondi)
3	6 Inter-stations justifiés (cohérent avec Q9)

Q11. Lors de la phase d'accélération, **déterminer** sous forme littérale, l'équation de la résultante dynamique projetée sur l'axe \vec{x} appliquée à la voiture (1) isolée. **En déduire** l'expression de $X_A + X_B$ en fonction de a_G , m_V , m_P , θ , et g .

Équation de la résultante dynamique : $\vec{A}(0 \rightarrow 1) + \vec{B}(0 \rightarrow 1) + \vec{P} = (m_V + m_P) \cdot \vec{a}_G$

Projection sur l'axe \vec{x} :

$$X_A + X_B - (m_V + m_P) \cdot g \cdot \sin \theta = (m_V + m_P) \cdot a_G$$

$$X_A + X_B = (m_V + m_P) \cdot (g \cdot \sin \theta + a_G)$$

0	Réponse totalement fausse ou non traitée
1	Équation vectorielle uniquement
2	Projection sur l'axe x
3	Projection sur l'axe x + expression de $x_A + x_B$

Q12. Déterminer l'expression littérale de X_A puis effectuer l'application numérique.

d'où : $X_A = X_B = \frac{(m_V + m_P) \cdot (g \cdot \sin \theta + a_G)}{2}$

Application numérique : $X_A = X_B = \frac{(14000 + 7500) \cdot (9,81 \cdot \sin 4,6 + 1,3)}{2}$

$$X_A = X_B = 22,4 \text{ kN}$$

0	Réponse totalement fausse ou non traitée
1	
2	Équation cohérente avec Q11 + application numérique incohérente
3	Réponse complète (équation+ application numérique+ résultats) en cohérence avec la question Q11

Q13. Écrire la condition de non glissement des roues aux points A et B, **effectuer** l'application numérique et **conclure** sur la capacité de la voiture à accélérer sur la pente à 8 %. Les angles α et α' doivent être contenus dans les cônes de frottements représentés sur la figure 7.

La condition de non glissement est donc $\alpha < \varphi$ et $\alpha' < \varphi$.

$$\tan \alpha = \frac{X_A}{Y_A} = \frac{22,4}{110} = 0,20 \quad \text{et} \quad \tan \alpha' = \frac{X_A}{Y_A} = \frac{22,4}{100} = 0,22$$

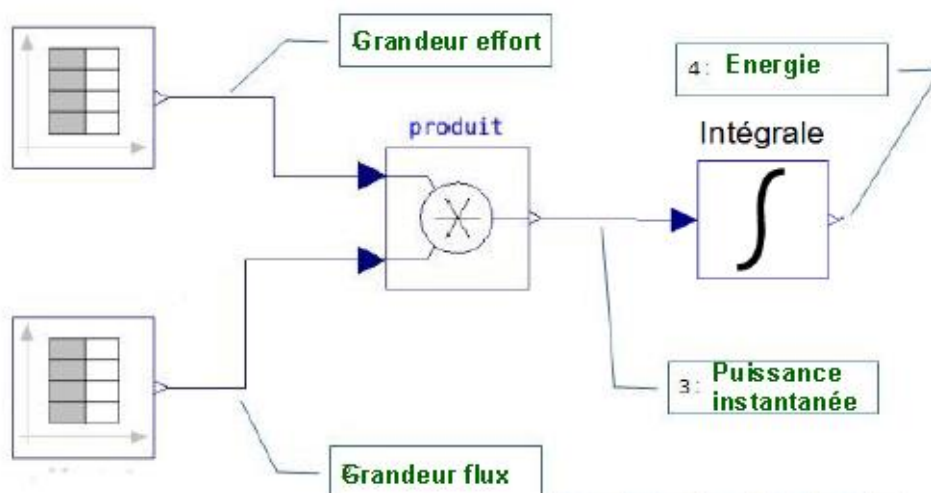
Lors de l'accélération de la rame, les actions du sol sont situées dans le cône de frottement car $\tan \alpha < \tan \varphi$ et $\tan \alpha' < \tan \varphi$. Il y a donc adhérence des roues sur le sol, la rame est donc en capacité d'accélérer sur la portion a 8 %. Le stockage de l'énergie de freinage se fait par volant d'inertie.

0	Réponse totalement fausse ou non traitée
1	Condition de non glissement sans calcul
2	Condition de non glissement + application numérique au regard de Q12
3	Réponse complète et exacte au regard de la question Q12

4. Stockage de l'énergie de freinage par volant d'inertie

Objectif(s) de cette partie : **vérifier** que le système à stockage inertiel permet la revalorisation des énergies de freinage excédentaires.

Q14. Placer sur le document réponse DR3, les informations « grandeur effort », « grandeur flux », « énergie » et « puissance instantanée », dans les cadres repères de 1 à 4.



0	Réponse totalement fausse ou non traitée
1	Une réponse exacte
2	2 ou 3 réponses exactes
3	Réponse complète

Q15. A partir de la figure 8, **estimer** l'énergie électrique revalorisée $E_{revalorisée}$ à l'instant $t=300$ s .

Le candidat trouvera $E_{revalorisée}=145-110=35$ MJ

0	Réponse totalement fautive ou non traitée
1	
2	
3	Réponse complète (entre 35 et 40)

Q16. En déduire l'énergie $E_{restituée}$ restituée par le SSI.

L' énergie restituée par le SSI doit prendre en compte le rendement deux fois (une fois pour le stockage, une fois pour la restitution), soit :

$$E_{restituée} = E_{revalorisée} \cdot (\eta_{mv})^2 = 24,7 \text{ MJ}$$

0	Réponse totalement fautive ou non traitée
1	
2	E restituée= E revalorisée x rendement en cohérence avec Q15
3	Réponse complète en cohérence avec Q15

Q17. Déterminer en pourcentage, l'écart relatif maximal d'énergie stockée à partir des résultats de la figure 9. **Conclure** sur la validité du modèle multi-physique.

$$E_{cart} = \frac{(26-19)}{19} \times 100 = 36,8\%$$

Le modèle n'est donc pas validé, l'écart étant supérieur à 7 %

0	Réponse totalement fautive ou non traitée
1	Calcul de pourcentage sur énergie simulée et non mesurée
2	Calcul de l'écart cohérent (sans conclusion ou conclusion fautive)
3	Réponse complète à l'erreur de lecture près

Q18. A l'aide du document technique DT2, **définir** le paramètre du modèle multiphysique à modifier (J_{SSI} ou C_f) pour se rapprocher de la réponse réelle.

Préciser et justifier s'il faut diminuer ou augmenter ce paramètre.

Pour que le modèle se rapproche du comportement réel, il faut augmenter le couple de frottements afin que la décélération et l' accélération soient plus proches de la réaliste.

0	Réponse totalement fautive ou non traitée
1	Définition du paramètre cf à modifier ou Jssi à modifier avec justification ou sens de variation
2	Définition du paramètre cf à modifier + augmentation du couple de frottement

	Ou Jssi à modifier avec justification et sens de variation
3	Réponse complète (cf à modifier+ augmentation du couple de frottement+ justificatif)

Q19. Calculer la variation d'énergie maximale stockée par le volant d'inertie pour huit rames en circulation. A l'aide de la valeur du moment d'inertie *JSSI renseignée* dans le modèle multi-physique (DT2), **déterminer**, la vitesse de rotation maximale du volant d'inertie pour huit rames en circulation.

L'énergie cinétique maximale stockée est de 38,6 MJ d'après la figure 8. La variation d'énergie cinétique maximale est : $\Delta E_c = 38,6 - 6,7 = 31,9$ MJ

La valeur J_{SSI} paramétrée dans le modèle est le moment d'inertie équivalent ramené sur l'axe moteur : $J_{SSI} = 376 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$.

$$\text{Or } E_{cmax} = \frac{1}{2} J_{SSI} \omega_{max}^2$$

La vitesse de rotation maximale du volant d'inertie vaut : $\omega_{max} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{cmax}}{J_{SSI}}} = 412 \text{ rad.s}$

0	Réponse totalement fausse ou non traitée
1	Variation énergie cinétique ou formule de l'énergie cinétique dans volant d'inertie
2	Variation énergie cinétique et formule de l'énergie cinétique dans volant d'inertie
3	Réponse complète wmax

Q20. A partir du document technique DT3, **indiquer** la contrainte équivalente de Von Mises maximale σ_{maxi} atteinte dans le volant et **déterminer** le coefficient de sécurité CS.

Contrainte maxi : $\sigma_{maxi} = 462 \text{ MPa}$

Coefficient de sécurité $CS = \frac{R_e}{\sigma_{maxi}} = \frac{551,5}{462} = 1,2$

0	Réponse totalement fausse ou non traitée
1	Contrainte maximale
2	Contrainte maximale et coefficient de sécurité avec résultat faux
3	Réponse complète

Q21. Conclure sur la capacité du volant à supporter cette survitesse et sur les transferts énergétiques réalisés dans ce cas.

Le volant n'est pas en mesure de supporter cette survitesse car $CS < 2$. L'énergie excédentaire sera donc dissipée par les rhéostats.

0	Réponse totalement fausse ou non traitée
1	
2	Analyse du coefficient de sécurité cohérente

3	Réponse complète (énergie évacuée)
----------	--------------------------------------------

5. Optimisation du chauffage des voies

Objectif de cette partie : Comment optimiser le chauffage des voies afin de réduire la consommation d'énergie ?

Q22. . Déterminer la tension Ue pour une temperature $T=4$ °C .

$a=0,25$; $b=2,5$; $Ue(4$ °C) $=3,5$ V

0	Réponse totalement fausse ou non traitée
1	Calcul d'un coefficient
2	Calcul des 2 coefficients
3	Réponse complète

Q23. Calculer la résolution analogique q (ou quantum) du convertisseur analogique-numérique, sachant que sa plage d'entrée est 0-10 V, et **spécifier** son unité. **Déterminer** la valeur décimale $N_{4^{\circ}C(10)}$ représentant la valeur en sortie du CAN lorsque la température extérieure est de 4 °C.

$$q = \frac{Ue_{max} - Ue_{min}}{2^n} = \frac{10 - 0}{2^8} = 0,039 \text{ V} \quad N_{(4^{\circ}C)} = \frac{Ue_{(4^{\circ}C)} - Ue_{min}}{q} = \frac{3,5 - 0}{0,039} = 89_{(10)}$$

Possible quantum avec 2^8-1

0	Réponse totalement fausse ou non traitée
1	Quantum sans unité
2	Quantum + unité
3	Réponse complète (quantum+ unité+ valeur) (89 ou 90)

Q24. Compléter l'algorithme du document DR4 page 27.

```

« Initialisation »
Ch ← 0
Début « Autorisation chauffage »
  Lire Hr
  Si Hr ≥ 205(10)
    Alors Appel « sous-programme chauffage voies »
    Sinon Ch ← 0
  Fin Si
Fin

```

```

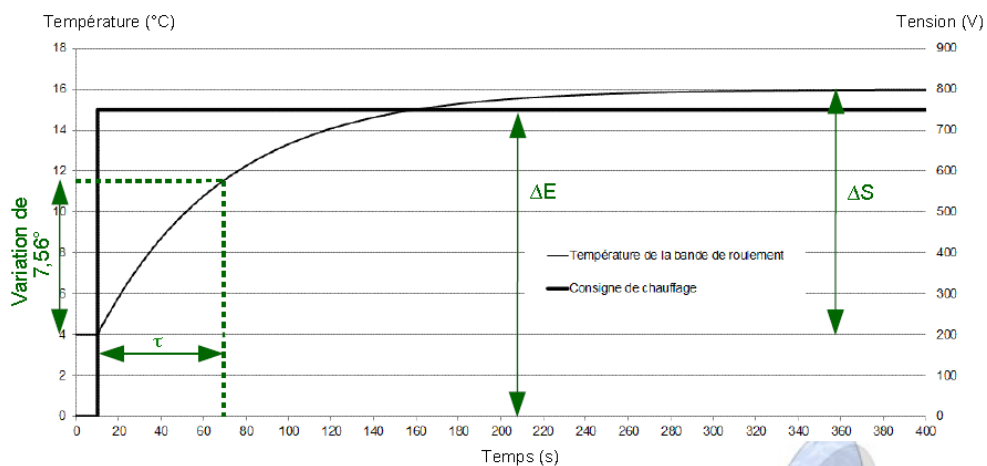
Début « sous-programme chauffage voies »
Lire Te
  Si Te ≤ 89(10)
    Alors Ch ← 1
  Fin Si
  Si Te ≥ 102(10)
    Alors Ch ← 0
  Fin Si
Fin

```

0	Réponse totalement fausse ou non traitée
1	
2	Une valeur
3	Réponse complète (2 valeurs)

Q25. A l'aide du relevé expérimental figure 17 et du document technique DT4, **déterminer** l'amplification statique K et la constante de temps τ en vue de paramétrer le modèle de comportement de la bande de roulement. **Préciser** les unités.

$$\text{Amplification statique : } K = \frac{\Delta S}{\Delta E} = \frac{12}{750} = 0,016 \text{ degré} \cdot \text{V}^{-1}$$



τ correspond au temps mis pour atteindre 63 % de ΔS soit : $0,63 \times \Delta S = 7,56 \text{ degré}$
 Constante de temps $\tau = 70 - 10 = 60 \text{ s}$

0	Réponse totalement fausse ou non traitée
1	Amplification statique ou constante de temps
2	Amplification statique et constante de temps sans unités
3	Réponse complète (amplification + constante + unité)

Q26. En justifiant la réponse, **préciser** quelle simulation correspond à l'élévation de température attendue (+8 °C ± 1 °C). Pour la simulation retenue, **déterminer** la période T et le rapport cyclique α à paramétrer dans le bloc commande de chauffage. **Estimer** en pourcentage, le gain énergétique réalisable par rapport au fonctionnement actuel ($\alpha=1$).

Le cahier des charges indique une stabilisation de l'élévation de température à +8°C±1°C.

- la simulation n°1 correspond au fonctionnement attendu.
- la période T de la commande de chauffage est de 50 s et le rapport cyclique $\alpha = \frac{t_{ON}}{T} = \frac{33}{50} = 0,66$
- gain énergétique réalisable : $(1 - 0,66) \times 100 = 34\%$

0	Réponse totalement fausse ou non traitée
1	simulation1 sans paramètres ou mauvaise simulation et paramètres cohérents.
2	Simulation1 avec bons paramètres ou gain énergétique ou mauvaise simulation et paramètres et gain cohérents.
3	Réponse complète (bonne simulation+ bons paramètres+ gain énergétique)

6. Synthèse

Objectif(s) de cette partie : proposer et justifier les choix énergétiques de la future ligne de métro de l'agglomération rennaise.

27. En s'appuyant sur les études précédemment menées, **proposer** et **justifier** les choix à mettre en place pour minimiser la consommation énergétique de la future ligne de métro (dix lignes maximum).

Pistes de réflexions possibles :

- limiter les dénivelés importants dans les zones aériennes (adhérence des roues) ;
- limiter les intervalles prohibés ;
- limiter tant que possible les incidents mineurs ;
- mettre en place d'un deuxième SSI ou remplacer le volant actuel par un volant plus important ;
- limiter les zones extérieures afin de minimiser le chauffage des voies.

0	Réponse totalement fausse ou non traitée
1	1 élément cité
2	2 ou 3 éléments cités
3	Réponse complète (4 ou plus)