

BAC S SI 2018 METROPOLE
Optimiser la consommation énergétique du métro rennais
Eléments de corrigé
Vincent CROS mai 2019



Métro de Rennes

Introduction :

L'étude proposée s'appuie sur la recherche d'optimisation et de minimisation de la consommation énergétique relative à l'exploitation, par la société **Kéolis**, d'une rame de métro de type VAL (Véhicule Automatique Léger) mise en œuvre sur la ligne N°1 du métro de la ville de Rennes.

Cette rame est développée par la société **Siemens France**.

Cette étude se décompose en cinq étapes de la manière suivante :

- **Etape 1** : Optimisation des temps séparant les rames successives ;
- **Etape 2** : Rattrapage du retard généré par un incident mineur ;
- **Etape 3** : Stockage de l'énergie de freinage par volant d'inertie ;
- **Etape 4** : Optimisation du chauffage des voies.
- **Etape 5** : Synthèse.

Etape 1

Optimisation des temps séparant les rames successives

Objectif(s) de cette partie : Vérifier qu'un choix judicieux des temps séparant les rames est une solution à la réduction de la consommation énergétique du métro.

La réversibilité énergétique des rames autorise des transferts d'énergie électrique des rames en décélération vers celles en demande d'énergie.

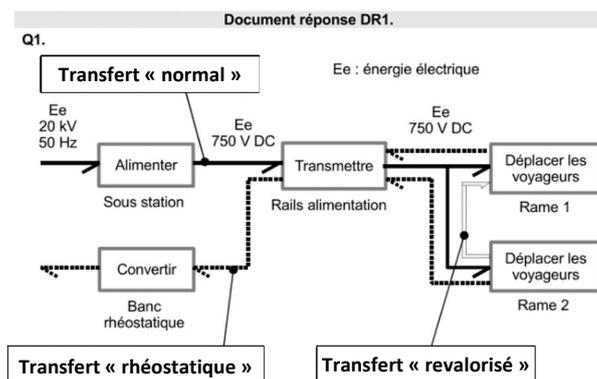
Dans le cas où aucune rame n'est en demande d'énergie, l'énergie de freinage est dissipée sous forme de chaleur dans un banc rhéostatique et est donc perdue.

Le document réponse DR1 page 25 illustre les transferts d'énergie, depuis le réseau électrique d'alimentation jusqu'aux rames (seules deux rames sont représentées). Lors de l'accélération des rames et **en l'absence de rame en décélération**, le transfert d'énergie est qualifié « **transfert normal** ».

Lorsqu'une ou plusieurs rames sont en décélération, l'énergie cinétique de décélération est transformée en énergie électrique. Deux cas peuvent se produire :

- Aucune rame n'est en phase d'accélération, le transfert d'énergie est qualifié « **transfert rhéostatique** » ;
- Une ou plusieurs rames sont en phase d'accélération, le transfert d'énergie est qualifié « **transfert revalorisé** ».

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.



3 types de transfert sont possibles, « normal », « rhéostatique » et « revalorisé ».

Dans la situation de transfert « normal » le flux d'énergie est unidirectionnel, sur le document réponse il est représenté en trait continu noir, d'où la légende.

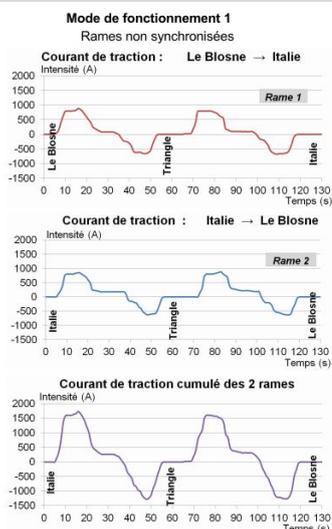
Dans la situation de transfert « rhéostatique » le flux d'énergie est bidirectionnel, sur le document réponse il est représenté en trait discontinu noir, d'où la légende.

Dans la situation de transfert « revalorisé » le flux d'énergie est bidirectionnel, sur le document réponse il est représenté en trait continu blanc, d'où la légende.

Afin d'estimer les courants absorbés et restitués par les rames (courant de traction) lors de leur déplacement, la société **Kéolis** a procédé à des relevés d'intensité de courant pour deux modes de fonctionnement distincts, avec deux rames en circulation en sens opposés, entre les stations **Le Blosne et Italie** (voir figure 1 et document technique DT1 page 20).

- Dans le mode de fonctionnement 1, l'essai a été réalisé sans synchronisation des accélérations et freinages des deux rames en sens opposés.
- Dans le mode de fonctionnement 2, l'essai a été réalisé avec synchronisation des accélérations et freinages des deux rames en sens opposés.

Q2 - À l'aide du document technique DT1, 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].



Hypothèse d'analyse :

On suppose que lorsque le courant est positif alors la rame consomme de l'énergie, dans le cas contraire elle en restitue.

Dans le cas du relevé ci-contre on constate que lorsque :

$5 \text{ s} \leq t \leq 35 \text{ s}$, le courant est positif donc la rame 1 consomme de l'énergie

$35 \text{ s} \leq t \leq 52 \text{ s}$, le courant est négatif donc la rame 1 restitue de l'énergie

Remarques :

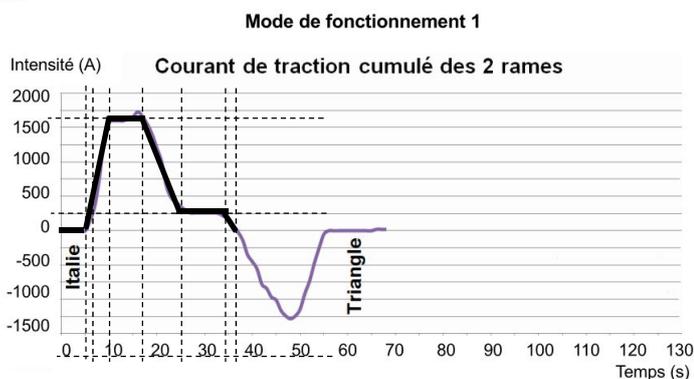
La démarche est analogue pour la rame 2, dans cette situation on constate que le courant cumulé fourni par le réseau correspond à la somme des courants des deux rames.

La tension d'alimentation des rames est de **750 V continue** supposée constante.

Q3 - À partir du document réponse DR2 (issu du document technique 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 tracés qui permettent de réaliser cette estimation.

Document réponse DR2.

Q3.



La puissance instantanée exprimée entre les stations **Italie et Triangle** s'exprime de la manière suivante :

$$P(t) = u(t) * i(t)$$

L'énergie consommée est déterminée lorsque le courant est fourni par le réseau par le calcul suivant :

$$W_{\text{Italie-Triangle}} = \int_0^{37} u(t) * i(t) * dt$$

Comme **u(t)** est constant alors :

$$W_{\text{Italie-Triangle}} = 750 * \int_0^{37} i(t) * dt$$

$$\int_0^{37} i(t) * dt, \text{ représente l'aire sous la courbe.}$$

L'aire peut être décomposée en plusieurs morceaux de la manière suivante :

Un trapèze de hauteur **I = 250 A** de petite base **T_{pb} = 35 - 7 = 28 s**, et de grande base **T_{gb} = 37 - 5 = 32 s**, l'aire d'un trapèze s'exprime de la manière suivante :

$$\frac{1}{2} * I * (T_{pb} + T_{gb}) = \frac{1}{2} * 250 * (28 + 32) = 7500 \text{ A} \cdot \text{s}$$

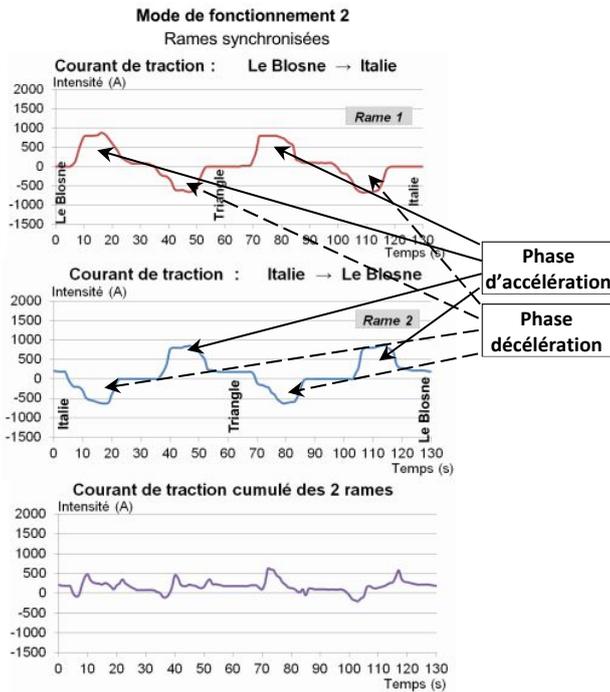
Un trapèze de hauteur **I = 1625 - 250 = 1375 A** de petite base **T_{pb} = 17 - 10 = 7 s**, et de grande base **T_{gb} = 25 - 7 = 18 s**, d'où :

$$\frac{1}{2} * I * (T_{pb} + T_{gb}) = \frac{1}{2} * 1375 * (7 + 18) = 17188 \text{ A} \cdot \text{s}$$

Compte tenu des calculs précédents il vient :

$$W_{\text{Italie-Triangle}} = 750 * (7500 + 17188) = 18516000 \text{ W} \cdot \text{s} = 5143 \text{ W} \cdot \text{h}$$

Q4 - À l'aide du document technique DT1, expliquer pourquoi le courant de traction cumulé obtenu lors du mode de fonctionnement 2 est d'amplitude plus faible que celui obtenu lors du mode de fonctionnement 1.



En s'appuyant sur les hypothèses développées à la question Q2, on s'aperçoit qu'en **synchronisant le fonctionnement des deux rames** l'une par rapport à l'autre, on peut faire en sorte qu'au moment où la rame 1 est en phase de démarrage, la rame 2 soit dans une phase de décélération, comme le courant cumulé s'obtient par addition temporelle des deux courants respectifs, on constate que le courant prélevé au réseau est notablement plus faible que dans le mode de fonctionnement asynchrone.

L'énergie consommée par les deux rames lors du mode de fonctionnement 2 a été estimée à 2 800 Wh entre les stations **Le Blosne et Italie**.

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

L'énergie non consommée se calcule de la manière suivante :

$$W_{\text{non consommée}} = W_{\text{mode1}} - W_{\text{mode2}} = 5143 - 2800 = 2343 \text{ Wh}$$

Donc en valeur relative :

$$\frac{W_{\text{non consommée}}}{W_{\text{mode1}}} = \frac{2343}{5143} = 0,455 = 45,5 \%$$

Dans un souci d'optimisation énergétique, la société **Kéolis** cherche à se rapprocher du mode de fonctionnement 2.

Cependant, le nombre de rames en circulation sur une journée fluctue de 6 à 22 en fonction de l'affluence des voyageurs.

La **figure 3**, issue de relevés expérimentaux, montre la corrélation qui existe entre le nombre de rames en circulation, les temps séparant deux rames successives et le pourcentage d'énergie non revalorisée (énergie perdue). Elle met en évidence la nécessité d'éviter certains temps séparant les rames (exemple : cinq rames en circulation avec un temps les séparant de **435 s**).

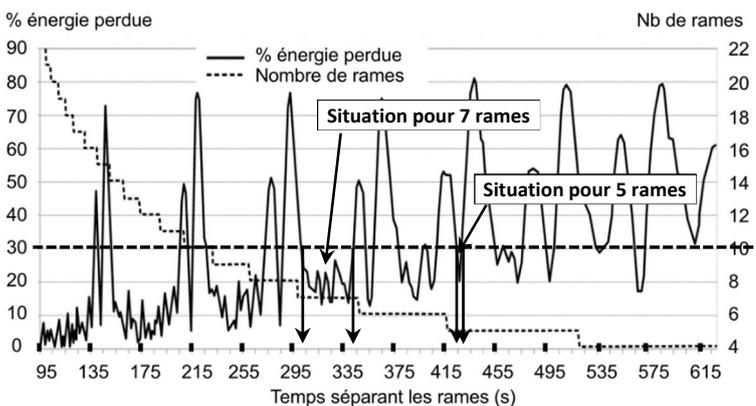


Figure 3 pourcentage de l'énergie de freinage perdue en fonction du nombre de rames en circulation.

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

La figure 3 ci-contre permet de déterminer la plage de temps qui permet un fonctionnement avec **7 rames**, cette plage est comprise entre **305 s et 345 s**.

Lors d'une augmentation de l'affluence des usagers, le pilotage centralisé du métro décide de passer de sept rames à neuf rames en circulation. Les rames sont insérées une à une sur la ligne de métro jusqu'à obtention du nombre souhaité.

Q7 - À 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.

L'insertion une à une des rames nécessite de réduire l'intervalle de temps séparant deux rames successives, cette diminution ne sera pas instantanée si bien que pendant une situation transitoire, l'énergie de freinage perdue pourra atteindre des pointes proches de **80 %**, donc l'analyse faite avec deux rames n'est pas réaliste, conclusion un taux de réduction de **45 %** est une valeur très optimiste.

Etape 2

Rattrapage d'un retard généré par un incident mineur

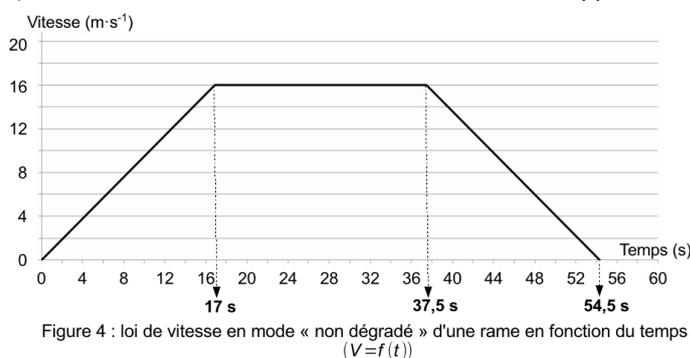
Objectif(s) de cette partie : Proposer une solution pour rattraper le retard engendré par un incident mineur afin de respecter l'intervalle prévu.

Les études menées dans l'étape 1 ont permis de montrer l'intérêt de cadencer judicieusement les différentes rames du métro afin de réduire sa consommation énergétique. Cependant, des incidents mineurs (porte bloquée...) perturbent quotidiennement le respect des intervalles.

Ces aléas sont connus et ne provoquent généralement que des retards modérés allant de 1 à 22 secondes qui doivent être rattrapés sur un nombre limité de trajets d'inter-stations.

Lois de vitesses suivies par les rames

La **figure 4** représente la loi de vitesse d'une rame en fonction du temps $V = f(t)$ entre les stations **Ponchaillou et Villejean Université** (voir figure 1) dans les conditions normales de fonctionnement appelées mode « non dégradé ».



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

On admet que le mouvement est un mouvement rectiligne qui se décompose en 3 phases, une phase d'accélération de **0 à 17 s**, une phase de déplacement à vitesse constante entre **17 et 37,5 s** et enfin une phase de décélération de **37,5 s à 54,5 s**.

Détermination du déplacement pendant la phase d'accélération :

$$x(t) = \frac{1}{2} * a * t^2 \text{ avec } a = \frac{16}{17} = 0,941 \text{ m/s}^2 \text{ donc } x(17) = \frac{1}{2} * \frac{16}{17} * 17^2 = 136 \text{ m}$$

Détermination du déplacement pendant la phase à vitesse constante $V_0 = 16 \text{ m/s}$:

en posant $t' = t - 17$ alors :

$$x(t') = V_0 * t' \text{ donc pour } t = 37,5 \text{ s soit } t' = 37,5 - 17 = 20,5 \text{ s alors } x(20,5) = 16 * 20,5 = 328 \text{ m}$$

Détermination du déplacement pendant la phase de décélération :

en posant $t'' = t - 37,5$ alors :

$$x(t'') = \frac{1}{2} * a'' * (t'')^2 + V_0 * t'', \text{ avec } a'' = \frac{-16}{54,5 - 37,5} = -\frac{16}{17} = -0,941 \text{ m/s}^2$$

pour $t = 54,5 \text{ s}$, soit $t'' = 17 \text{ s}$, $x(17) = -\frac{1}{2} * \frac{16}{17} (17)^2 + 16 * 17 = \frac{1}{2} * 16 * 17 = 136 \text{ m}$

Conclusion le déplacement complet est de :

$$x = 136 + 328 + 136 = 600 \text{ m}$$

On peut aussi déterminer ce déplacement à partir du fait que :

$$x = \int_0^{54,5} v(t) * dt \text{ qui correspond à l'aire du trapèze } = \frac{1}{2} * 16 * [(37,5 - 17) + 54,5] = 600 \text{ m}$$

La vitesse des rames est en fait gérée par la loi $V = f(x)$ représentée sur la **figure 5** (vitesse V en fonction de la position x) qui a été obtenue à partir de la loi $V = f(t)$ (figure 4).

En cas d'incidents mineurs, le mode « dégradé » doit permettre à une rame de **rattraper** son retard sur quelques inter-stations. La **figure 5** montre qu'en mode « dégradé », la phase de déplacement à vitesse constante n'existe plus.

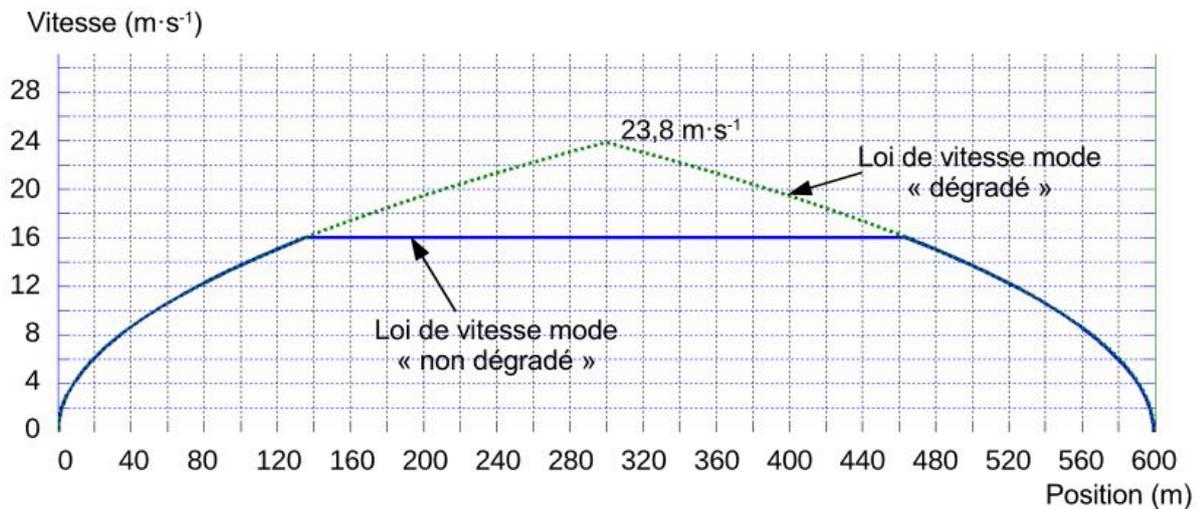


Figure 5 : loi de vitesse d'une rame en fonction de sa position ($V = f(x)$)

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

Dans le fonctionnement en mode « dégradé » on **supprime la phase à vitesse constante** alors on atteindra un déplacement de **300 m** en :

$$x\left(\frac{t_{deg}}{2}\right) = \frac{1}{2} * \frac{16}{17} * \left(\frac{t_{deg}}{2}\right)^2 = 300 \text{ m donc } t_{deg} = 2 * \sqrt{\frac{300}{\frac{1}{2} * \frac{16}{17}}} = 50,5 \text{ s}$$

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 réalisable pour une inter-station Δt est de :

$$\Delta t = 54,5 - 50,5 = 4 \text{ s}$$

Donc pour **rattraper un retard de 22 s** il faut entre **5 et 6 inter-stations**.

Incidence du profil de la voie de circulation des rames

L'étude précédente a permis de montrer que la loi de vitesse en mode « dégradé » entre les stations **Ponchailou** et **Villejean Université** permet de rattraper une partie du retard.

Cependant, cette inter-station présente deux particularités nécessitant de vérifier que la rame est capable de suivre la loi de vitesse en mode « dégradé ». En effet, cette inter-station est une portion aérienne, soumise aux intempéries et présentant le plus fort dénivelé de la ligne du métro (**pente de 8 %** équivalant à un angle θ de **4,6°** représenté sur la figure 6).

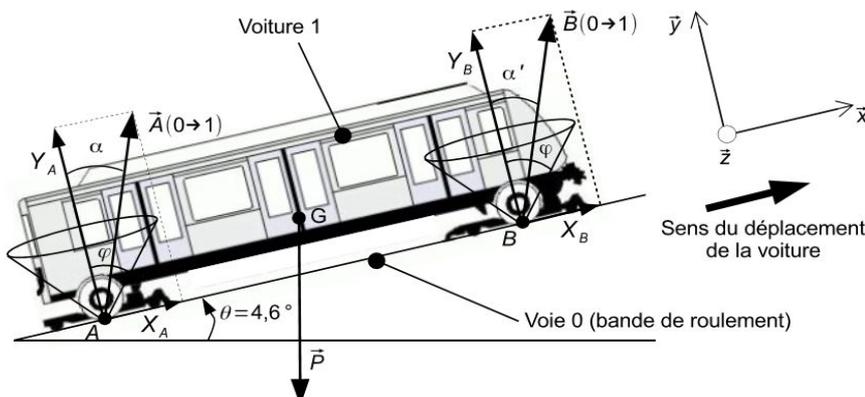


Figure 6 : représentation des actions mécaniques appliquées à la voiture (1) isolée

Remarque : l'inclinaison de la voie n'est pas représentée à l'échelle et aucune mesure n'est à prendre sur la figure 6.

L'étude sera menée dans le plan de symétrie (O, \vec{x}, \vec{y})

Les données sont les suivantes :

- Masse d'une voiture, $m_v = 14\ 000\ \text{kg}$;
- Nombre maximal de passagers par voiture, 75, soit une masse $m_p = 7\ 500\ \text{kg}$;
- Accélération limitée à $a_G = 1,3\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ pour le confort des passagers ;
- Action de l'air sur la voiture et résistance au roulement négligées au regard des autres actions en présence ;
- Accélération de la pesanteur, $g \approx 9,81\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Les actions mécaniques extérieures appliquées à la voiture (1) sont :

- \vec{P} , le poids de la voiture et des usagers appliqué en G ;
- $\vec{A}(0 \rightarrow 1)$, l'action de la voie sur la voiture appliquée en A ;
- $\vec{B}(0 \rightarrow 1)$, l'action de la voie sur la voiture appliquée en B.

L'étude sera menée sur une seule voiture dans la position de la figure 6 en phase d'accélération.

Q11 - Lors de la phase d'accélération, **déterminer** sous forme littérale, l'équation de la résultante dynamique projetée sur \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 de g

L'équation de la résultante dynamique appliquée à la voiture (1) s'exprime de la manière suivante :

$$\vec{P} + \vec{A}(0 \rightarrow 1) + \vec{B}(0 \rightarrow 1) = (m_v + m_p) * \vec{a}_G$$

En projection sur \vec{x} , il vient :

$$-P * \sin\theta + X_A + X_B = (m_v + m_p) * a_G$$

$$-(m_v + m_p) * g * \sin\theta + X_A + X_B = (m_v + m_p) * a_G$$

$$X_A + X_B = (m_v + m_p) * (a_G + g * \sin\theta)$$

Les couples délivrés par les roues motrices avant et arrière étant considérés équivalents, les efforts tangentiels \vec{X}_A et \vec{X}_B sont par conséquent égaux.

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

$$X_A = X_B = \frac{1}{2} (m_v + m_p) * (a_G + g * \sin\theta)$$

$$X_A = X_B = \frac{1}{2} (14000 + 7500) * (1,3 + 9,81 * \sin(4,6)) = 22432,6\ \text{N} = 22,4\ \text{kN}$$

Les équations des moments dynamiques aux points A et B ont permis de déterminer les efforts normaux aux contacts de la voie (0) sur la voiture (1). Les résultats sont les suivants : $Y_A = 110\ \text{kN}$ et $Y_B = 100\ \text{kN}$.

Le coefficient de frottement entre le rail (acier grenailé) et les pneus est égal à $f = \tan \varphi = 0,3$ lorsque la voie est humide.

Q13 - **Ecrire** 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 %.

Pour que la condition de non-glissement soit vérifiée, il faut que les angles α et α' soient contenu dans l'angle φ correspondant au cône de frottements.

$$\tan(\alpha) = \frac{X_A}{Y_A} = \frac{22,4}{110} = 0,204 \text{ et } \tan(\alpha') = \frac{X_B}{Y_B} = \frac{22,4}{100} = 0,224$$

conclusion : ces deux valeurs sont **inférieures** à f , donc la **capacité à accélérer est respectée**.

Etape 3

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.

Les études précédentes ont montré qu'une bonne gestion des intervalles de temps entre les rames et des retards permet de diminuer l'énergie dissipée dans les bancs rhéostatiques.

Un système à stockage inertiel (SSI) représenté sur la **figure 7**, a été mis en place pour limiter ces pertes. Une partie de cette énergie, appelée énergie revalorisée, est stockée dans le volant d'inertie, par l'intermédiaire **d'un ensemble machine synchrone - variateur**, au lieu d'être dissipée. Elle peut ensuite être restituée aux rames.

Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Moment d'inertie, $J_{SSI} = 376 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
- Vitesse comprise entre $188 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ et $377 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

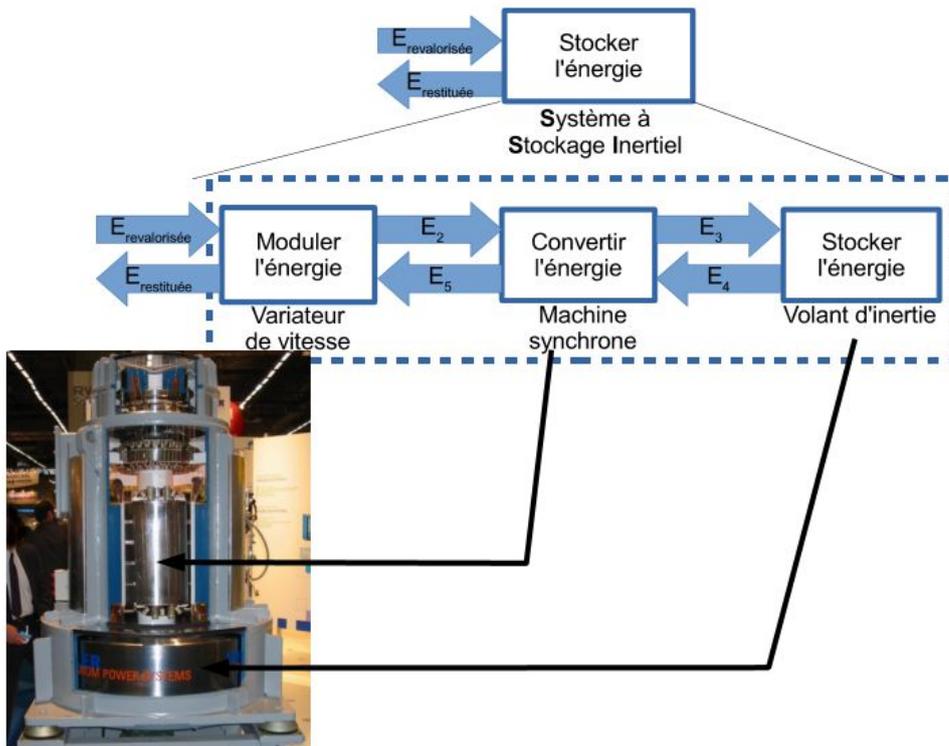


Figure 7 : système à stockage inertiel (SSI)

Le schéma du document **réponse DR3 page 26**, construit à partir des données réelles de l'intensité cumulée pour sept rames en circulation et de la tension entre les rails d'alimentation, indique la méthode qui a permis d'estimer les énergies mises en jeu.

Les transferts d'énergie sont caractérisés par le produit de deux grandeurs « **effort** » et « **flux** ».

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

En physique, on caractérise la puissance échangée entre deux composants ou sous-systèmes comme le produit de deux types de grandeurs :

- Une grandeur d'effort : cette grandeur est associée à une notion de « transfert de matière » au sens large.
- Une grandeur de flux : cette grandeur est associée à une notion de « débit » au sens large.

Voici quelques exemples :

Domaine d'activités	Grandeur de flux f	Grandeur d'effort
Electrique	Le courant $i(t)$ en $A (C \cdot s^{-1})$	La différence de potentiel $u(t)$ en V , elle va engendrer un déplacement d'électrons.
Mécanique en translation	La vitesse $v(t)$ en $m \cdot s^{-1}$	La force $F(t)$ en N , elle va engendrer un déplacement d'un solide en translation
Mécanique en rotation	La vitesse $\omega(t)$ en $rad \cdot s^{-1}$	Le couple $C(t)$ en $m \cdot N$, il va engendrer un déplacement en rotation.
Hydraulique	Le débit $q(t)$ en $m^3 \cdot s^{-1}$	La pression $p(t)$ en Pa , elle va engendrer le déplacement d'un fluide.

Q14.

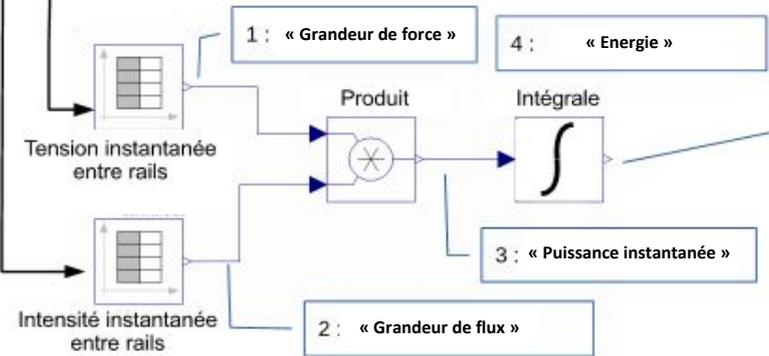
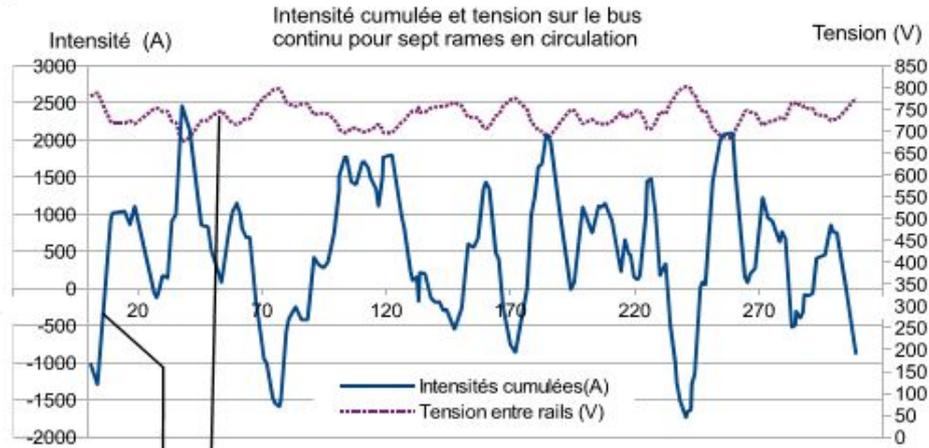


Schéma d'estimation de l'énergie

À partir de ces données, les énergies consommées avec revalorisation (réutilisation de l'énergie récupérée au freinage) et sans revalorisation (dissipation rhéostatique de l'énergie récupérée au freinage) ont été estimées. Les résultats sont représentés sur la figure 8.

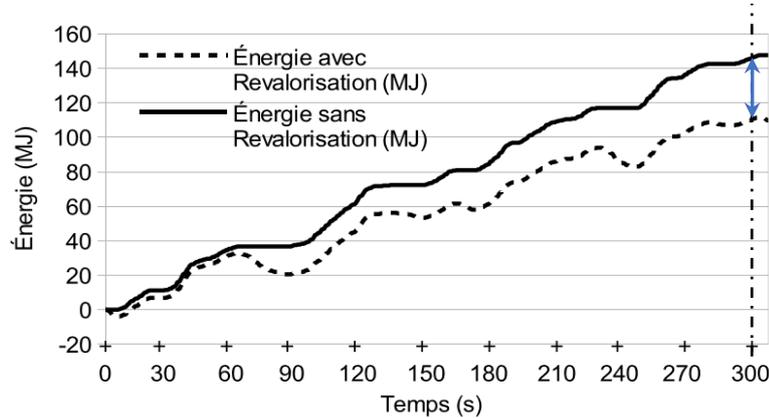


Figure 8 : consommation énergétique avec ou sans revalorisation des énergies perdues pour 7 rames en circulation

L'énergie récupérable par le SSI est la différence entre l'énergie avec revalorisation et l'énergie sans revalorisation.

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

Par lecture sur la figure on peut estimer que :

$$E_{\text{revalorisation}} = 145 - 110 = 35 \text{ MJ}$$

Le rendement, supposé constant, de l'ensemble machine synchrone-varianteur η_{mv} est de 0,84 lors du stockage et de la restitution.

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

Le système met en œuvre 2 phases de fonctionnement, une de stockage et une de restitution conclusion le rendement va intervenir dans les 2 phases donc :

$$E_{\text{restituée}} = \eta_{\text{mv}}^2 * E_{\text{revalorisation}} = 0,84^2 * 35 = 24,7 \text{ MJ}$$

Afin d'optimiser les performances énergétiques du métro, un modèle multi-physique a été élaboré (voir document technique DT2). Ce modèle a permis d'évaluer l'énergie restituée cumulée par le système à stockage inertiel (SSI) pour sept rames en circulation. **La figure 9** met en corrélation les résultats de simulation du modèle avec les résultats expérimentaux.

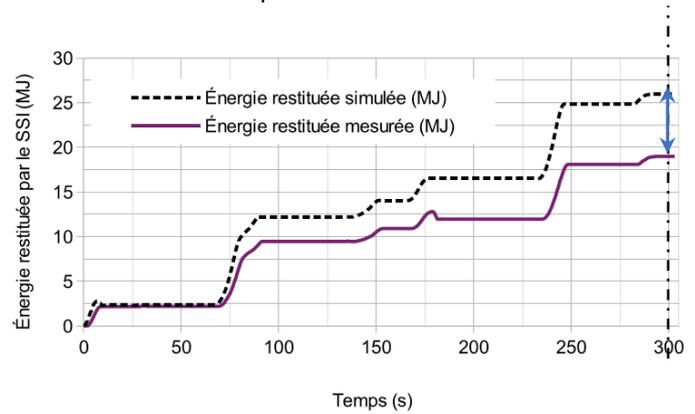
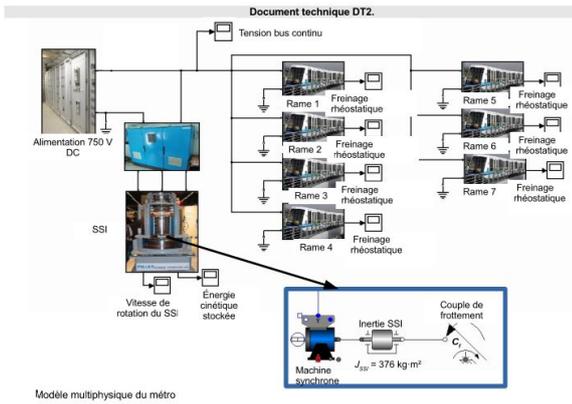


Figure 9 : résultats de simulation et de mesure de l'énergie restituée par le SSI

Le modèle sera acceptable dès lors que les écarts relatifs sur les énergies restituées obtenues par le modèle et par les mesures ne divergent pas de plus de **7 %** (prendre l'énergie mesurée comme référence).

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.

L'écart absolu le plus grand a lieu pour $t = 300$ s cet écart est de $26 - 18,25 = 7,75$ MJ donc l'écart relatif d'énergie stockée sera dans ce cas de :

$$\frac{7,75}{18,25} = 42,5 \%$$

L'écart absolu le plus petit a lieu pour $t = 100$ s cet écart est de $12 - 9 = 3$ MJ donc l'écart relatif d'énergie stockée sera dans ce cas de :

$$\frac{3}{9} = 33,3 \%$$

Conclusion l'élaboration du modèle n'est pas validé.

Afin d'améliorer le modèle multi-physique, une analyse de la vitesse de rotation du SSI est réalisée à partir des données expérimentales et simulées. Les résultats sont donnés **figure 10**.

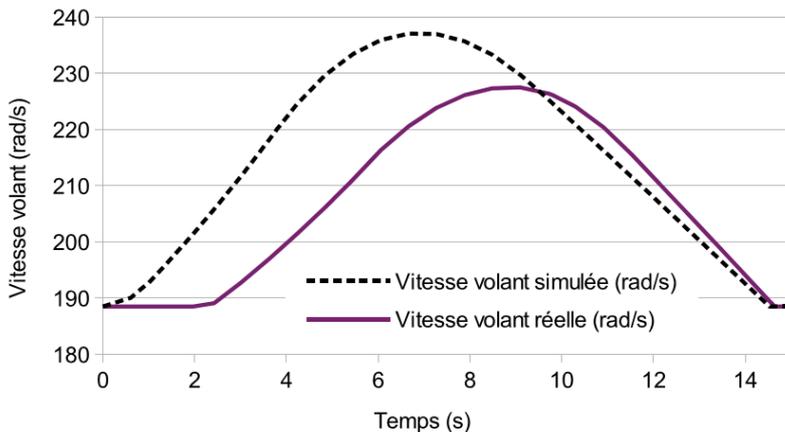


Figure 10 : courbes simulée et réelle de la vitesse du volant entre 0 s et 15 s

La figure 10 met en évidence les écarts suivants :

- Un décalage temporel (négligé dans le questionnement) ;
- Une accélération simulée plus importante ;
- Une décélération simulée plus faible ;
- Un stockage simulé plus important.

Q18 - À l'aide du document technique DT2 page 21, définir le paramètre du modèle multi-physique 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.

L'équation de la dynamique des systèmes en rotation s'exprime de la manière suivante :

$$C_{moteur} - (C_{résistant} + C_f) = J_{SSI} * \frac{d\Omega}{dt}$$

L'augmentation de l'inertie J_{SSI} aura un effet sur les phases d'accélération et de décélération, en augmentant le temps de mise en rotation où d'arrêt, à coefficient d'accélération constant. L'augmentation du couple de frottement C_f aura un effet sur la valeur du coefficient d'accélération, en effet si le couple C_f augmente, à couple moteur constant, alors le coefficient d'accélération sera plus faible.

Dans notre cas il faudrait augmentait le couple de frottement C_f .

Le paramètre du modèle modifié précédemment a permis de valider le modèle multi-physique pour sept rames en circulation.

Le réinvestissement de ce modèle pour huit rames en circulation a permis d'estimer l'énergie stockée par le volant d'inertie (figure 11).

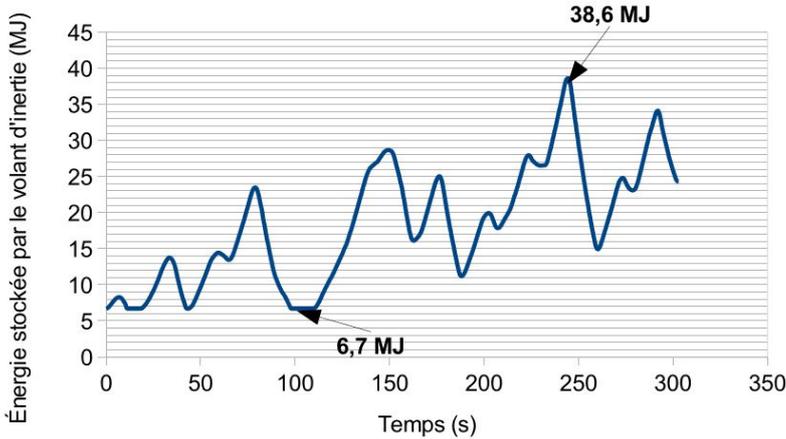


Figure 11 : simulation de stockage inertiel pour huit rames en circulation

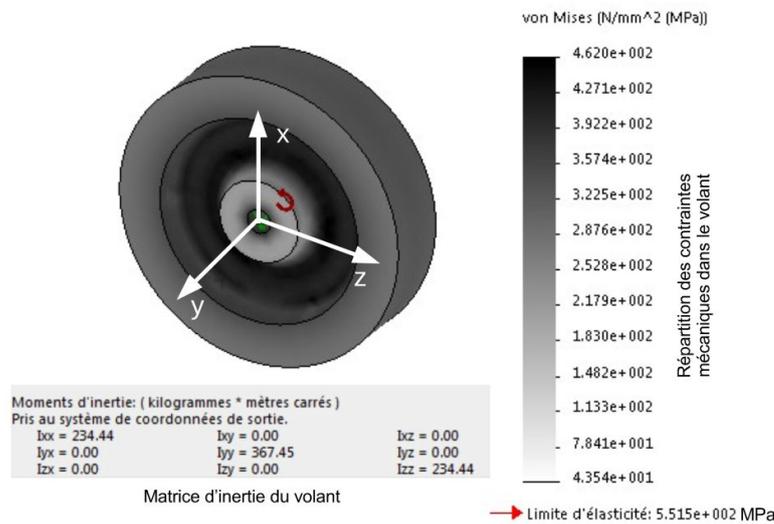
Ici :

$$E_{Cmax} = 38,6 \text{ MJ et } J_{SSI} = 376 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \text{ donc } \Omega_{max} = \sqrt{\frac{E_{Cmax}}{\frac{1}{2} * J_{SSI}}} = 453 \text{ rad/s}$$

La machine synchrone du SSI étant capable de dépasser une vitesse de 377 rad.s^{-1} , il faut vérifier que le volant d'inertie supporte aussi cette vitesse.

Le modèle volumique du volant (document technique DT3 page 22) a permis d'obtenir la contrainte mécanique équivalente de Von Mises lors d'une mise en rotation à la vitesse maximale précédemment trouvée.

Un coefficient de sécurité **CS** supérieur ou égal à 2 doit être assuré d'un point de vue de la résistance des matériaux. La machine



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

Par exploitation des informations de la figure 11 on peut déterminer la valeur de la variation d'énergie stockée maximale :

$$\Delta E_c = 38,6 - 6,7 = 31,9 \text{ MJ}$$

Par ailleurs, l'énergie cinétique stockée s'exprime de la manière suivante :

$$E_{Cmax} = \frac{1}{2} * J_{SSI} * \Omega_{max}^2$$

Q20 - À 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**.

La contrainte de Von Mises maximum à pour valeur :

$$\sigma_{maxi} = 4,62 \cdot 10^2 \text{ MPa}$$

La limite d'élasticité pour le matériau choisi est :

$$R_e = 5,515 \cdot 10^2 \text{ MPa}$$

Ici $\sigma_{maxi} < R_e$ donc le volant d'inertie supporte la vitesse maximale prévue, le coefficient de sécurité est de :

$$CS = \frac{R_e}{\sigma_{maxi}} = \frac{5,515 \cdot 10^2}{4,62 \cdot 10^2} = 1,193$$

Q21 - Conclure sur la capacité du volant à supporter cette survitesse. **Indiquer** les conséquences sur les transferts énergétiques.

Comme la valeur de **CS** est inférieure à 2 le volant d'inertie n'est pas capable de supporter la totalité de l'énergie à dissiper, il faudra commencer par dissiper une partie de l'énergie en mode rhéostatique puis basculer en mode de stockage, enfin si on cherche l'efficacité maximale il faudra revoir la conception du SSI.

Etape 4 Optimisation du chauffage des voies

Objectif(s) de cette partie : Valider la solution technique choisie pour optimiser le chauffage des voies afin de réduire la consommation d'énergie.

Afin d'éviter l'accumulation de neige ou de glace sur les voies situées en extérieur, plusieurs câbles chauffants alimentés en 750 V continu, sont installés sous les bandes de roulements (voir figure 12). La société **Kéolis** souhaite améliorer le contrôle du chauffage afin de réduire sa consommation énergétique.

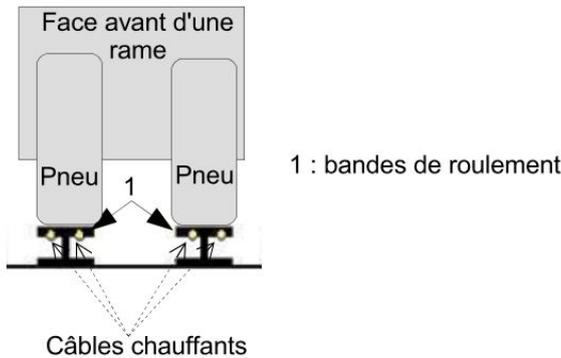


Figure 12 : profil schématique d'une voie

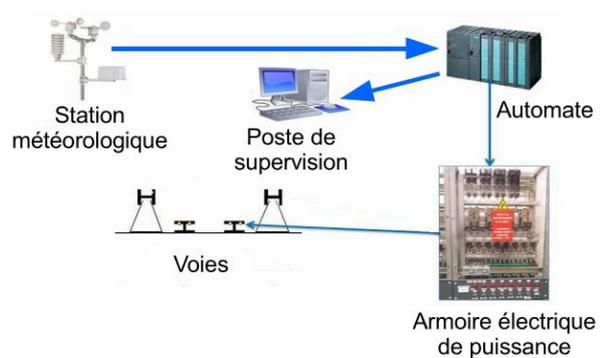


Figure 13 : architecture de la commande de chauffage des voies

Conditions de mise en chauffe des bandes de roulement

Une station météorologique (voir figure 13), composée notamment d'une sonde de température et d'un capteur d'hygrométrie, mesure les conditions climatiques extérieures qui sont transmises à un automate programmable gérant le chauffage des voies.

Le chauffage des voies est mis en action lorsque la température extérieure T_e devient inférieure ou égale à 4°C et que le taux d'hygrométrie Hr est supérieur ou égal à 80 %.

Le capteur de température fournit une tension variable entre 0 V et 10 V pour une température évoluant entre -10°C et 30°C (soit une pleine échelle de 40°C). Cette information est numérisée par un convertisseur analogique-numérique 8 bits (CAN).

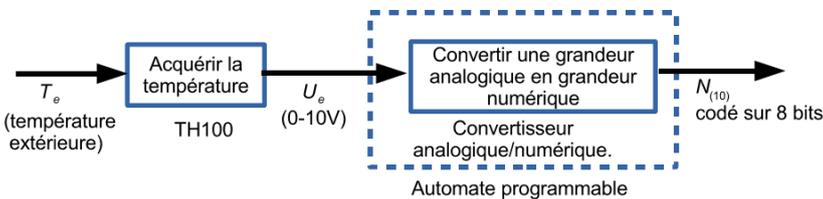


Figure 14 : chaîne d'acquisition de la température

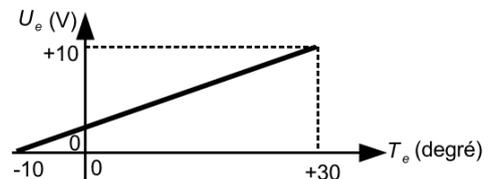


Figure 15 : loi entrée-sortie du capteur de température

La loi entrée-sortie du capteur de température est de la forme $U_e = a * T_e + b$.

Q22 - Déterminer la tension U_e pour une température $T_e = 4^\circ\text{C}$.

La pente a de la courbe se détermine de la manière suivante : $a = \frac{10}{40} = 0,25\text{ V}/^\circ\text{C}$

La valeur de b de la courbe se détermine par application du théorème de Thalès de la manière suivante :

$$\frac{b}{10} = \frac{10}{40} \text{ donc } b = \frac{100}{40} = 2,5\text{ V}$$

Conclusion :

$$U_e(4) = 0,25 * 4 + 2,5 = 3,5\text{ V}$$

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

Le convertisseur effectue la conversion sur 8 bits soit 2^8 valeurs, conclusion :

$$q = \frac{\Delta U_e}{2^8} = \frac{10}{256} = 0,039\text{ en V}$$

$$U_e(4) = 3,5\text{ V} \text{ donc } N_{4^\circ\text{C}(10)} = 256 * \frac{3,5}{10} = 89,6 \text{ on choisi } N_{4^\circ\text{C}(10)} = 90$$

L'autorisation de fonctionnement du chauffage fonctionne selon le schéma de la figure 16 :

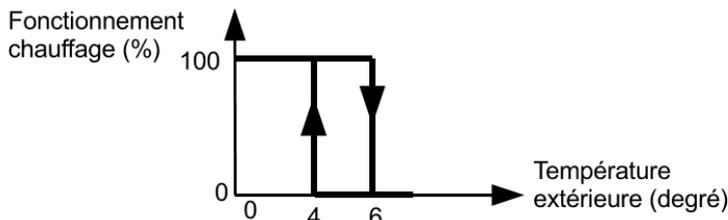


Figure 16 : caractéristique de fonctionnement du chauffage des voies

- Lorsque la température extérieure T_e est inférieure ou égale à 4 °C , le chauffage des voies est activé et restera activé tant que la température extérieure T_e sera inférieure à 6 °C ;
- Lorsque que la température extérieure T_e est supérieure ou égale à 6 °C , le chauffage est désactivé et restera désactivé tant que la température extérieure T_e sera supérieure à 4 °C ;

Le fonctionnement est géré par un algorithme utilisant les variables définies ci-dessous :

- Hr : hygrométrie.
- Te : température extérieure.
- Ch : variable de mise à l'arrêt ou en marche du chauffage
- $Ch = 0$: arrêt.
- $Ch = 1$: marche.

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

```

« Initialisation »
Ch ← 0
Début « Autorisation chauffage »
  Lire Hr
  Si Hr ≥ 205(10) // Si le taux d'hygrométrie est supérieur ou égal à 80 %
    Alors Appel « sous-programme chauffage voies »
    Sinon Ch ← 0 //arrêt du chauffage
  Fin Si
Fin

Début « sous-programme chauffage voies »
  Lire Te
  Si Te ≤ 90(10) // Si la température est inférieure à 4° C
    Alors Ch ← 1 // mise en route du chauffage
  Fin Si
  Si Te ≥ 102(10) // Si la température extérieure est supérieure ou égale à 6°C
    Alors Ch ← 0 // mise à l'arrêt du chauffage
  Fin Si
Fin
  
```

Gestion de la commande de chauffage

L'étude suivante vise à définir les paramètres de mise en chauffe des bandes de roulement afin de stabiliser leur élévation de température à $+ 8\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$. Aucun capteur n'étant utilisé pour réguler le système de chauffage, un relevé expérimental du comportement d'une bande de roulement mise en chauffe a été réalisé (figure 17). Ces mesures doivent permettre de modéliser son comportement thermique et ainsi de déterminer les paramètres optimaux de la commande de chauffage.

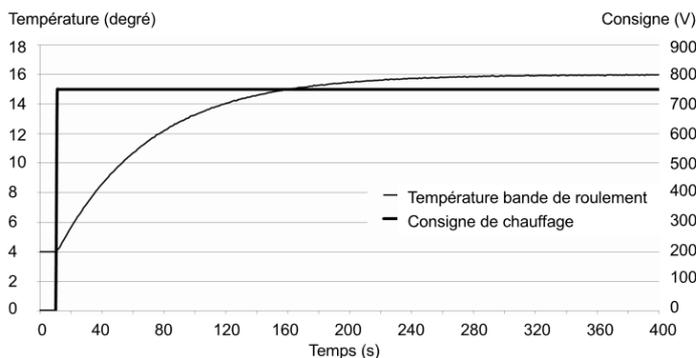


Figure 17 : relevé expérimental de la mise en chauffe d'une bande de roulement

Le modèle de la commande de chauffage est représenté sur la figure 18.

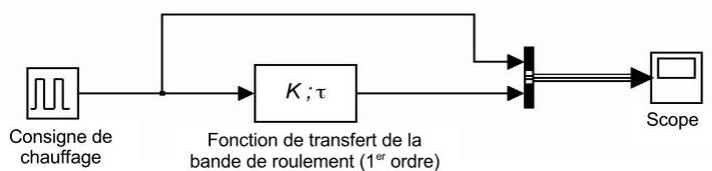


Figure 18 : modèle de la commande de chauffage

Q25 - À l'aide du relevé expérimental figure 17 et du document technique DT4 page 23, **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.

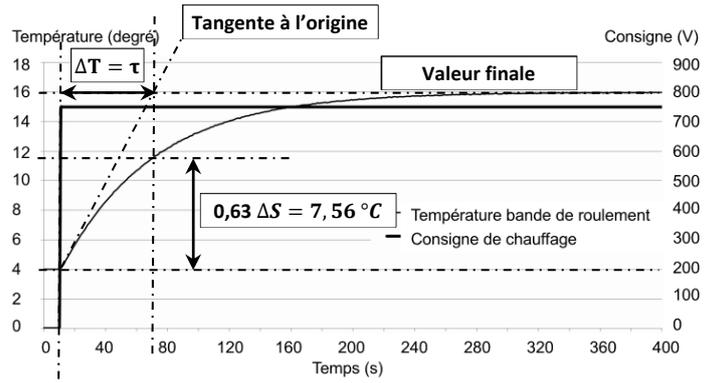
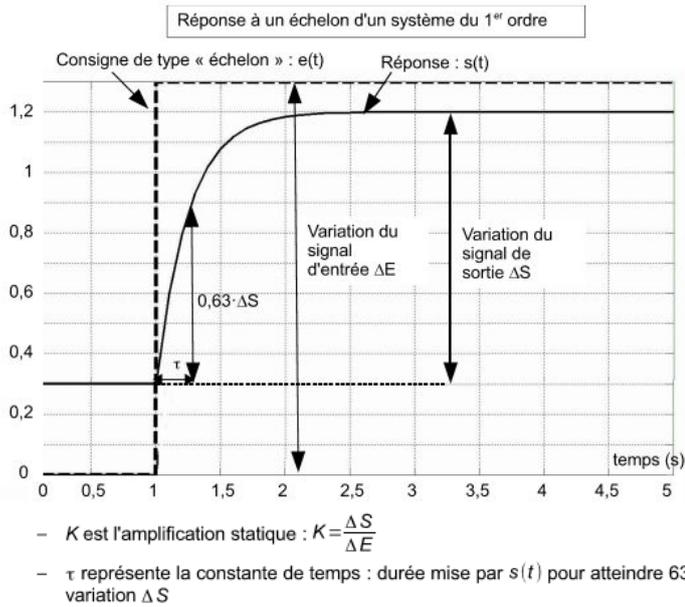


Figure 17 : relevé expérimental de la mise en chauffe d'une bande de roulement

Dans notre cas

$$\Delta E = 750 \text{ V et } \Delta S = 16 - 4 = 12 \text{ °C}$$

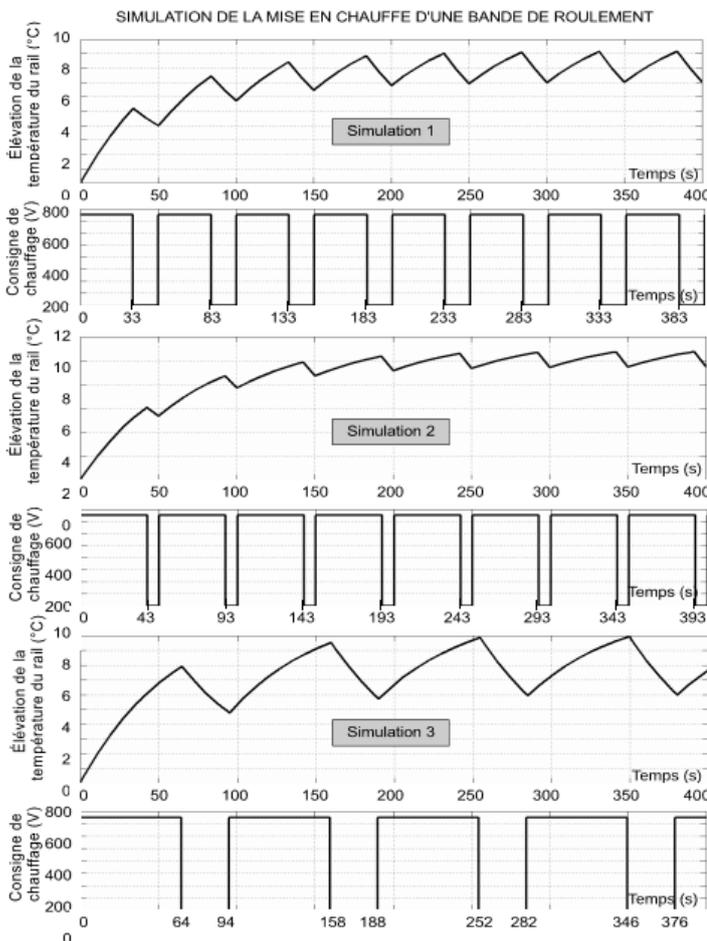
$$\text{donc } K = \frac{12}{750} = 16 \cdot 10^{-3} \text{ °C/V}$$

ΔS = 12 °C donc 0,63 * ΔS = 7,56 °C, par lecture sur le tracé ΔT = τ = 60 s

REMARQUE : on peut déterminer τ en utilisant la tangente à l'origine et la connaissance de la valeur finale, comme tracé sur la figure 17.

Le document technique DT5 page 24 montre trois simulations de mise en chauffe d'une bande de roulement.

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 (α=1).



Par analyse des trois simulations on constate que la **simulation 1** répond au cahier des charges. Pour cette situation on détermine que :

$$\text{La période } T = 50 \text{ et que } \alpha * T = 33 \text{ s donc } \alpha = \frac{33}{50} = 66 \%$$

Conclusion le gain énergétique peut être estimé à **34 %**.

Etape 5 Synthèse

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

Une seconde ligne de métro sans conducteur est actuellement en construction dans l'agglomération rennaise. Sa mise en service est prévue pour l'année 2020.

Q27 - 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).

Le travail effectué permet de valider les évolutions du système de commande en particulier la synchronisation du fonctionnement des rames les unes par rapport aux autres, il faudrait minimiser les tronçons aériens et favoriser le stockage inertiel en faisant évoluer le système SSI pour cela il faut probablement augmenter la valeur du moment d'inertie J_{SSI} .