

SESSION 2016

**AGRÉGATION
CONCOURS INTERNE
ET CAER**

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

**Option : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR
ET INGÉNIERIE ÉLECTRIQUE**

EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE D'UN DOSSIER TECHNIQUE

Durée : 6 heures

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

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : La copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

LES CYTOCULTEURS DANS LE DOMAINE BIOMÉDICAL

Le sujet comporte 39 pages :

- **Questionnement** : pages 1 à 20
- **Annexes et Documents ressources** : pages 21 à 35
- **Documents réponses DR1 à DR5** : pages 36 à 39

Toutes les parties sont à traiter.

Présentation de l'épreuve.

L'objectif de cette épreuve est d'évaluer les capacités du candidat à élaborer des activités pédagogiques à partir du dossier technique constitué du présent sujet.

L'épreuve doit permettre au candidat de prouver ses capacités à créer des modèles adaptés aux élèves en utilisant les logiciels ou systèmes existants dans les établissements.

Au cours du sujet, le candidat est invité à développer des activités pédagogiques, en fin de sujet il est demandé une synthèse qui mettra en évidence la cohérence de ces développements.

Conseils aux candidats

Une lecture préalable et complète du sujet est indispensable, des informations utiles sont présentes dans les documents ressources.

Il sera tenu compte de la cohérence avec laquelle les candidats traiteront les questions, le jury préférant une réflexion d'ensemble des parties abordées à un éparpillement des réponses. Certaines parties restent toutefois indépendantes.

Les candidats sont invités à numéroter chaque page de leur copie et à indiquer clairement le numéro de la question traitée.

Les candidats sont priés de rédiger les différentes parties (3 à 8) sur feuilles séparées et clairement repérées.

Il leur est rappelé qu'ils doivent utiliser les notations propres au sujet, présenter clairement les calculs et dégager ou encadrer tous les résultats.

Tout résultat incorrectement exprimé ne sera pas pris en compte. En outre les correcteurs leur sauront gré d'écrire lisiblement et de soigner la qualité de leur copie.

Il sera tenu compte de la qualité de rédaction, en particulier pour les réponses aux questions ne nécessitant pas de calcul. Le correcteur attend des phrases complètes respectant la syntaxe de la langue française.

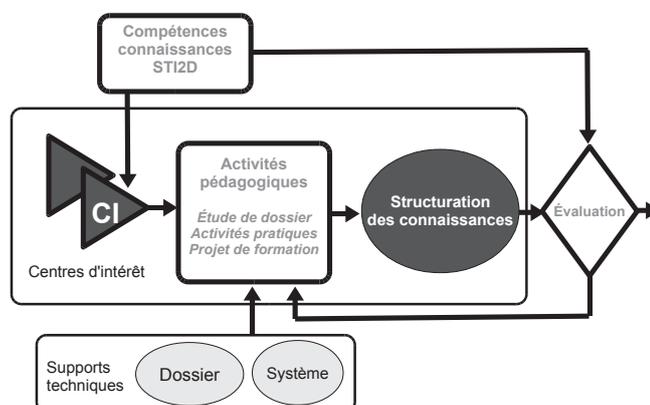
Il est rappelé que lors du passage d'une forme littérale à son application numérique, il est recommandé aux candidats de procéder comme suit : après avoir rappelé la relation littérale, chaque grandeur est remplacée par sa valeur numérique en respectant la position qu'elle avait dans la relation puis le résultat numérique est donné sans calculs intermédiaires et sans omettre son unité.

Si le texte du sujet, de ses questions ou de ses annexes, vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement dans votre copie.

1. PRESENTATION DE LA SÉQUENCE PÉDAGOGIQUE

1.1 INDICATIONS D'ORGANISATION

- La séquence pédagogique portera sur l'enseignement de spécialité énergie et environnement en terminale STI2D
- La séquence ne se limitera pas aux activités proposées dans le sujet. Le candidat peut envisager d'autres activités dont il définira les objectifs et le cadre. Il pourra aussi utiliser d'autres systèmes et outils disponibles dans un établissement.
- La classe concernée comporte 30 élèves,
- L'ensemble des activités proposées aura lieu dans une salle spécifique disposée en îlots comportant chacun deux ordinateurs équipés des logiciels usuels de simulation et de modélisation.



Les centres d'intérêt : une organisation pédagogique

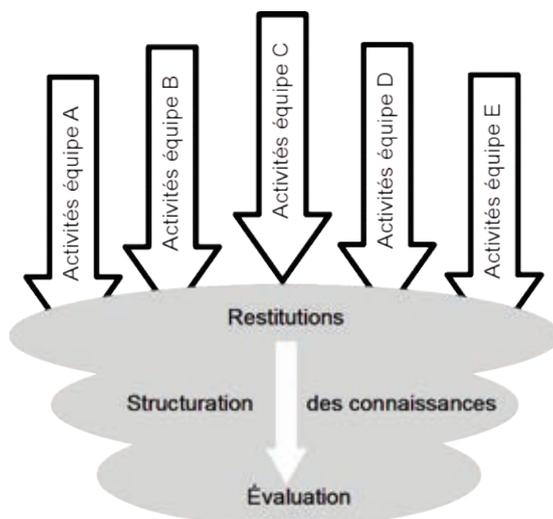
- La prise en compte des centres d'intérêt dans l'organisation des enseignements : Les activités de formation permettront, à l'intérieur d'une séquence, de viser l'appropriation de connaissances et compétences relatives à un nombre limité de **centres d'intérêts** afin de réduire le temps entre la phase d'activités de formation et la phase de structuration des connaissances. La notion de centre d'intérêt, organisation qui permet d'enseigner à un moment donné et sur des systèmes techniques différents, une classe limitée de connaissances et de compétences, est basée sur l'identification, dans le référentiel, des savoirs qui méritent une approche inductive.

Défini par des connaissances et des compétences, un CI permet d'aborder des points particuliers d'un programme. Afin de ne pas s'éloigner d'approches porteuses de sens, il est intéressant de construire un CI autour de problématiques réelles significatives. Un CI s'appuie obligatoirement sur les supports disponibles d'un établissement.

1.2 DESCRIPTION D'UNE SÉQUENCE PÉDAGOGIQUE COMPLÈTE

L'ensemble des activités proposées ne devra couvrir que 2 centres d'intérêts au maximum.

L'organisation de la séquence proposée comporte au préalable une phase de mise en situation, puis sera construite conformément au graphe suivant :



Le sujet permet de développer les « Activités équipe A, B... »

2. PRÉSENTATION DU PROCESS

Le système étudié se situe dans le domaine des biotechnologies défini par l'OCDE par :

« l'application de la science et de la technologie à des organismes vivants, de même qu'à ses composantes, produits et modélisations, pour modifier des matériaux vivants ou non-vivants aux fins de la production de connaissances, de biens et de services. »

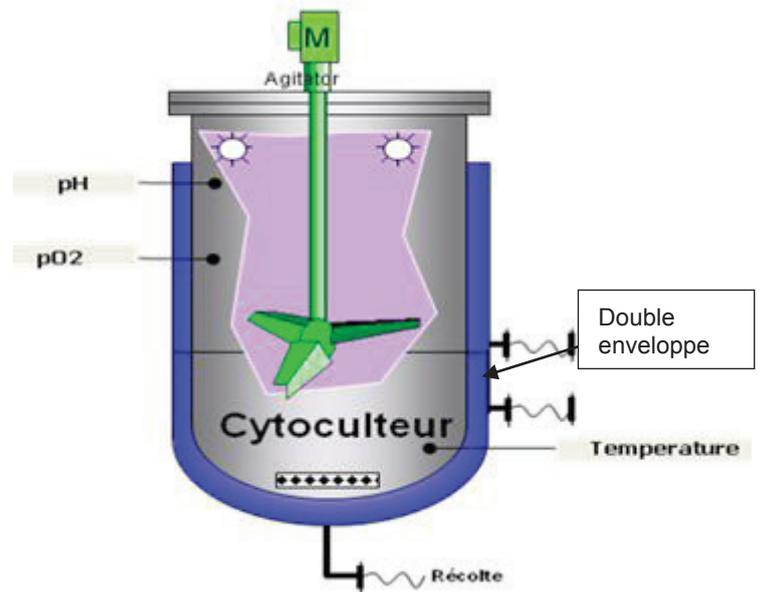
Il est inclus dans un processus de culture virale de cellules biologiques en trois étapes :

- préparation de la biomasse avec une culture cellulaire qui fournit un support au virus ;
- culture virale où le virus est au contact de cellules propices à son développement en parasitant le fonctionnement cellulaire ;
- récupération de la solution en livrant un volume congelé.

La préparation de la biomasse consiste à mettre les cellules dans des appareils apportant des conditions favorables à leur développement. Elle se fait en quatre phases et chacune est caractérisée par des systèmes de volume de plus en plus important. Le système étudié est utilisé dans la troisième phase et a une capacité de trente litres.

La mise en œuvre de ce type de culture nécessite un récipient particulier appelé cytoculteur (voir figure ci-contre). C'est une cuve hermétique possédant un fond rond, qui est chauffée par une double enveloppe pour avoir un faible gradient de température.

La circulation du liquide caloporteur de la double enveloppe est assurée par une pompe. Ce liquide est chauffé par un échangeur thermique chaud (vapeur en entrée) et il est refroidi par un échangeur thermique froid (eau glycolée en entrée).



Le cycloculteur est pourvu de dispositifs d'agitation et de régulation de température, de pH, de concentration en oxygène (pO₂). Pour garder la stérilité du milieu, une surpression de 0,2 bars par rapport au local est maintenue dans la cuve.

2.1 CONTRAINTES

Température : 37°C ± 0,2°C à ne pas dépasser sous peine de détruire les cellules

Taux d'oxygène : 40% régulé par adjonction d'oxygène

pH : 7,2 régulé par adjonction de soude ou introduction de CO₂

2.2 OPÉRATIONS

Afin d'assurer la culture cellulaire, le cytoculteur doit subir plusieurs opérations :

- nettoyage du cytoculteur
- tests sous pression
- stérilisation de la cuve en injectant de la vapeur d'eau saturée à 121°C
- refroidissement de la cuve (1 heure maxi)
- chargement du milieu de culture à 5°C
- préchauffage milieu cuve pleine de 5°C à 37°C (2 heures maxi)
- injection de la biomasse pour une culture d'une durée de 4 jours
- récolte

3. CAHIER DES CHARGES CYTOCULTEURS : CULTURE CELLULAIRE

Rappel : 1 calorie = 4,1855 J

Cytoculteur

Capacité du cytoculteur : 30 litres

Densité du produit $d_1 = 1$

Chaleur spécifique du produit $Ch_1 = 1 \text{ kcal.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$

Agitation : 50 tr/min

Double enveloppe

Pression double enveloppe : 1013 mBar

Circulation : $2 \text{ m}^3/\text{h}$

Surface d'échange de la double enveloppe : $S = 0,371 \text{ m}^2$

Volume double enveloppe avec tuyauterie : $V_{DE} = 13,4 \text{ litres}$

Échangeur à plaques : Circuit Eau glacée (refroidissement du fluide caloporteur de la double enveloppe)

Pression maxi : 6 bars

Eau glycolée : 1 / 4°C

Température maxi de service : 4°C

Échangeur à plaques : Circuit Vapeur (chauffage du fluide caloporteur de la double enveloppe)

Pression maxi : 3 bars

Températures maxi de service : 148°C

Question 1. Présenter le système aux élèves sous forme de diagrammes des exigences, des cas d'utilisation et du diagramme de séquences non chronologique.

4. PROCESS

En prévision de l'exploitation pédagogique, le travail préparatoire du professeur conduit à valider le dimensionnement de la double enveloppe.

4.1 DIMENSIONNEMENT DE LA DOUBLE ENVELOPPE

Les calculs doivent permettre de vérifier que la puissance de la double enveloppe est suffisante pour assurer les temps de toutes les phases de fonctionnement (stérilisation, refroidissement, préchauffage, maintien,...).

Nous nous limiterons ici à la vérification du temps de préchauffage du cytoculteur (milieu cuve pleine)

Grâce à la double enveloppe, on porte les 30 litres (V_1) de produit (milieu) contenus dans le cytoculteur de 5°C à 37°C, en décomposant en deux phases de 5°C à 35°C puis de 35°C à 37°C.

4.1.1 Montée de 5°C à 35°C

$T_{1d} = 5^\circ\text{C}$ (température de départ du produit)

$T_{1f}=35^{\circ}\text{C}$ (température finale du produit en fin de préchauffage)
Température d'entrée double enveloppe $T_{2e}=40^{\circ}\text{C}$
Température de sortie double enveloppe $T_{2s}=37^{\circ}\text{C}$
 K : coefficient moyen d'échange thermique global de la double enveloppe
 $K=163\text{ kcal}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$

Question 2. Calculer le pouvoir d'échange Q_1 de la double enveloppe (en kcal/h), en utilisant la règle de calcul suivante :
 $Q_1=K\times S\times((T_{2e}+T_{2s})/2-T_{1d})$

Question 3. Calculer le besoin calorifique P_1 (kcal) du produit, quantité de chaleur pour monter en température le produit.

Question 4. Calculer le temps de préchauffage de 5°C à 35°C .

4.1.2 Montée de 35°C à 37°C

La température du produit doit passer de 35°C à 37°C .

Température d'entrée double enveloppe $T_{2e}=40^{\circ}\text{C}$
Température de sortie double enveloppe $T_{2s}=37^{\circ}\text{C}$

Question 5. Calculer le pouvoir d'échange Q_2 de la double enveloppe, le besoin calorifique P_2 du produit et le temps de préchauffage de 35°C à 37°C .

4.1.3 Temps de préchauffage total

Question 6. Le temps de préchauffage est-il compatible avec le cahier des charges ? Discuter de la règle de calcul « simplifiée » utilisée.

4.2 DIMENSIONNEMENT DE L'ÉCHANGEUR

L'échangeur est le dispositif de production du fluide caloporteur circulant dans la double enveloppe.

4.2.1 Puissance

Question 7. À partir des questions précédentes, donner la puissance minimale de l'échangeur à installer pour assurer la phase de préchauffage (de 5°C à 35°C) précédemment décrite. Donner la réponse en watts.

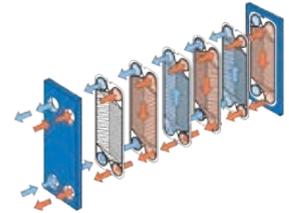
4.2.2 Calcul du débit de la pompe de circulation

Question 8. Calculer le débit de la pompe de circulation (en l/h) qui permet d'assurer les températures en entrée et en sortie de la double enveloppe.

4.2.3 Dimensionnement d'un des échangeurs

Lors de la phase montée en température, l'échangeur chaud doit être capable de fournir une puissance de 2,36 kW. La technologie retenue est un échangeur à plaques en acier inoxydable soudées abrasées. L'objectif de cette partie est de calculer la surface de plaques nécessaires.

Les échangeurs thermiques à plaques soudées par fusion sont constitués d'un jeu de plaques ondulées disposant de deux orifices par lesquels s'effectue la circulation des fluides qui permet le transfert de chaleur. La disposition des plaques et des orifices permet une circulation adjacente des deux fluides à **écoulement turbulent**, toujours dans un flux à **contre-courant**.



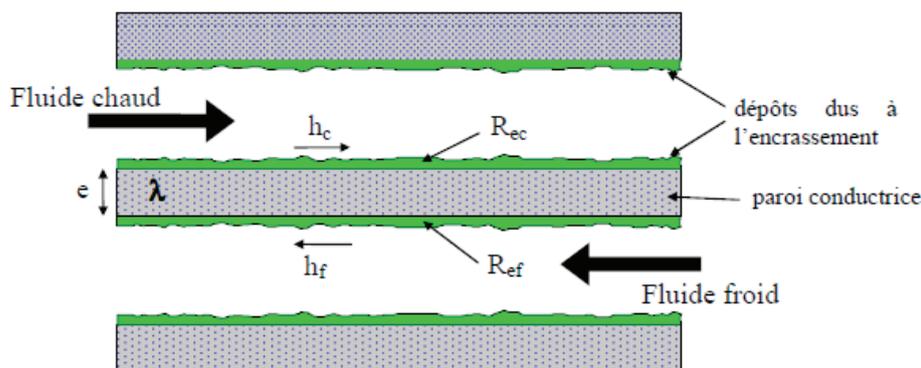
Hypothèses de calcul : régime permanent et pas de génération ni d'accumulation de chaleur, l'échange se situe entre deux fluides au sein de l'échangeur sans pertes thermiques (échangeur adiabatique), les propriétés physiques des fluides en question sont supposées constantes dans l'intervalle de température étudié et l'échange est unidirectionnel dans le sens de l'écoulement (pas d'échange radial entre les fluides).

L'indice « c » concerne les données du fluide chaud et l'indice « f » les données du fluide froid.

Si T_c et T_f sont les températures des deux fluides au droit d'un élément dS de la surface d'échange, le flux dq échangé entre les deux fluides au travers dS s'écrira :

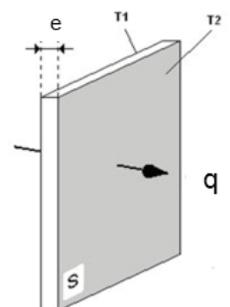
$$dq = k \times dS \times (T_c - T_f) \text{ (relation(1))}$$

Où k est le coefficient d'échange global entre les deux fluides au niveau de l'élément dS , exprimé en $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. On admet que le coefficient k reste constant le long de l'échangeur. Il représente la conductance thermique interposée entre les deux fluides, qui comprend cinq termes : les deux coefficients de transfert surfaciques par convection fluide-paroi (h_c et h_f), les résistances thermiques surfaciques d'encrassement (R_{ec} et R_{ef}) et un terme de conduction à travers la paroi modélisé par une résistance thermique surfacique (R_{sc}).



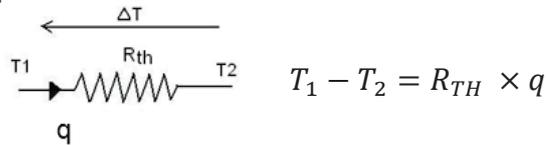
4.2.3.1 Calcul du coefficient d'échange k

On rappelle que le flux thermique q (en W) à travers une paroi monocouche de surface latérale S (en m^2), d'épaisseur e (en m) et de conductivité thermique λ (en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) est donné par la relation suivante :

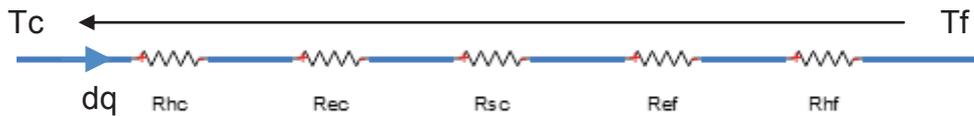


$$T_1 - T_2 = \frac{e}{\lambda \times S} \times q$$

Cette même équation peut se symboliser par sa résistance thermique R_{th} , par analogie avec une résistance électrique :



Par analogie avec un système électrique, on peut donner le modèle suivant de l'échangeur à travers un élément dS :



$$\Delta T = T_c - T_f = \Sigma R \times \frac{dq}{dS} = (R_{hc} + R_{ec} + R_{sc} + R_{ef} + R_{hf}) \times \frac{dq}{dS}$$

Avec :

- Rec : résistance thermique surfacique d'encrassement côté chaud, $2 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$;
- Ref : résistance thermique surfacique d'encrassement côté froid, $2 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$;
- Rhc = $1 / h_c$ avec h_c : coefficient de transfert surfacique par convection entre la vapeur et le métal en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$;
- Rhf = $1 / h_f$ avec h_f coefficient de transfert surfacique par convection entre l'eau et le métal en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$;
- Rsc : résistance thermique surfacique en $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ modélisant la conduction à travers la paroi du métal d'épaisseur $e=1\text{mm}$ et de conductivité thermique $\lambda=15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;
- dS : un élément de la surface d'échange en m^2 ;
- d : distance entre deux plaques (1,8 mm) ;

On rappelle la relation (1) :

$$dq = k \times dS \times (T_c - T_f) \text{ (relation(1))}$$

Question 9. Exprimer k en fonction de e , λ , h_c , h_f , Rec et Ref .

Question 10. Calculer la résistance thermique surfacique R_{sc} en $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

Question 11. En utilisant l'annexe « Dimensionnement échangeur », montrer que h (coefficient de transfert surfacique par convection) est égal à :

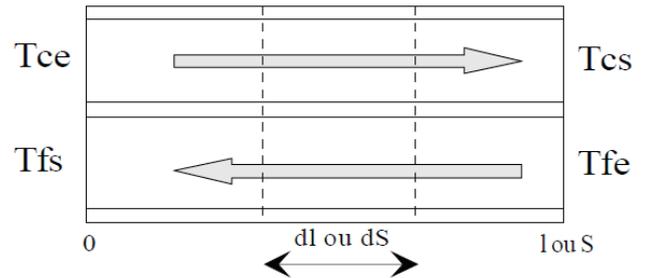
$$h = \frac{\lambda_F \times 0,023 \times \left(\frac{\rho \times v \times 2 \times d}{\mu} \right)^{0,8} \times \left(\frac{\mu \times Cp}{\lambda_F} \right)^{0,33}}{2 \times d}$$

Question 12. En déduire les valeurs de h_c et h_f . Calculer la valeur de k .

4.2.3.2 Calcul de la surface de l'échangeur

Pour cette partie, on prendra $k = 1806 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

On note \dot{m}_c et \dot{m}_f les débits massiques des deux fluides, c_{pc} et c_{pf} leurs chaleurs massiques à pression constante.



La quantité de chaleur perdue par le fluide chaud est $dq = -\dot{m}_c \times c_{pc} \times dT_c$ (relation (2)).

La quantité de chaleur gagnée par le fluide froid est $dq = -\dot{m}_f \times c_{pf} \times dT_f$ (relation (3)).

Question 13. En utilisant les relations (1) (2) et (3), montrer que

$$\frac{d(T_c - T_f)}{T_c - T_f} = -k dS \left(\frac{1}{\dot{m}_c \times c_{pc}} - \frac{1}{\dot{m}_f \times c_{pf}} \right) \text{(relation(4))}$$

En intégrant la relation (4) le long de la surface d'échange en introduisant les conditions aux extrémités (T_{ce} , T_{cs} , T_{fs} , T_{fe}), on obtient :

$$\ln(T_{ce} - T_{fs}) - \ln(T_{cs} - T_{fe}) = -k S \left(\frac{1}{\dot{m}_c \times c_{pc}} - \frac{1}{\dot{m}_f \times c_{pf}} \right) \text{(relation(5))}$$

Si on exprime le flux total échangé en fonction des températures d'entrée et de sortie du fluide (bilan enthalpique global) :

$$q = \dot{m}_c \times c_{pc} \times (T_{ce} - T_{cs}) \text{(relation(6))}$$

$$q = \dot{m}_f \times c_{pf} \times (T_{fs} - T_{fe}) \text{(relation(7))}$$

Question 14. En utilisant la relation (5) et les relations (6) et (7), exprimer la puissance de l'échangeur q en fonction de k , S , T_{ce} , T_{cs} , T_{fs} et T_{fe} .

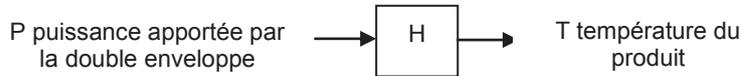
Question 15. Calculer la surface S nécessaire en utilisant les données en annexe « Dimensionnement échangeur » et sachant que la puissance de l'échangeur doit être de 2,36 kW.

4.2.4 Partie pédagogique

Question 16. L'échangeur thermique est au programme de l'enseignement transversal en STI2D. On donne en documentation ressource un extrait du programme de cet enseignement. On vous demande de proposer une activité pédagogique en donnant le centre d'intérêt, les objectifs fixés et la compétence attendue à l'issue de l'activité, la problématique proposée aux élèves, matériel et ressources nécessaires et une trame du document donné aux élèves.

5. MODÉLISATION DE LA DOUBLE ENVELOPPE

Le travail préparatoire du professeur consiste à modéliser la double enveloppe afin de mettre à disposition des élèves des outils de simulation qu'ils renseigneront ensuite avec certaines caractéristiques du système et des points de fonctionnement.



Deux modèles sont ci-après développés un « modèle de connaissance » et un « modèle thermique acausal ».

5.1 MODÈLE DE CONNAISSANCE

5.1.1 Équation temporelle

Grâce à la double enveloppe, on porte les 30 litres contenus dans le cytotuteur de $T_{1d} = 5^{\circ}\text{C}$ (température de départ du produit) à $T_{1f} = 35^{\circ}\text{C}$ (température finale du produit en fin de préchauffage).

Température d'entrée double enveloppe $T_{2e} = 40^{\circ}\text{C}$

Température de sortie double enveloppe $T_{2s} = 37^{\circ}\text{C}$

Question 17. En posant $x(t)$ la température du produit à l'instant t ($T_{1d}=x(0)$) et dx la variation de cette température pendant dt , écrire que la puissance fournie par la double enveloppe est égale à la puissance reçue par le produit. Reprendre la règle de calcul de la question 2.

Question 18. En déduire l'équation différentielle liant $x(t)$ et V_1 volume de la Double enveloppe (DE),
 K : coefficient moyen d'échange thermique global de la double enveloppe $K= 163\text{kcal.h}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{C}^{-1}$
 d_1 : densité
 S : surface d'échange
Chaleur spécifique $Ch_1= 1\text{kcal.kg}^{-1}.\text{C}^{-1}$

Question 19. Résoudre l'équation différentielle afin d'obtenir $x(t)$.

Question 20. Vérifier les temps trouvés lors des calculs de dimensionnement et discuter des écarts éventuels et de la conformité par rapport au cahier des charges.

Les élèves de STI2D ne possédant pas encore la méthode de résolution des équations différentielles utilisée ci-dessus, on se propose d'utiliser une résolution numérique Python ou Scilab pour vérifier le temps de préchauffage.

Il s'agit de résoudre par la méthode d'Euler l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{T_{2m}}{\tau} - \frac{x}{\tau}$$

Avec $T_{2m}=38.5^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1782$ s et $x(0)=5^{\circ}\text{C}$

On prendra $h=1s$ pour le pas de calcul, on connaîtra ainsi $x(t)$ pour chaque seconde.
L'intervalle d'intégration sera choisi en fonction des résultats obtenus aux questions précédentes.

Question 21. Rappeler le principe de la méthode d'Euler.

Question 22. Donner l'équation de récurrence qui permet de calculer $x_{n+1}=x((n+1)h)$ en fonction de x_n , h , T_{2m} et τ .

Question 23. Proposer soit l'algorithme, soit un programme Python ou Scilab qui permet de résoudre cette équation différentielle par la méthode d'Euler. Prévoir la représentation temporelle de $x(t)$ sur un intervalle que vous justifierez.

L'activité proposée aux élèves doit leur permettre de comparer les temps de montée en température du produit en utilisant deux méthodes différentes :

- ✓ d'une part les calculs menés dans le paragraphe « DIMENSIONNEMENT DE LA DOUBLE ENVELOPPE »
« Règle de calcul simplifié »
- ✓ d'autre part le modèle de connaissance développé ci-dessus.

Question 24. Préciser les hypothèses qui ont été faites pour chacune des deux méthodes.

Question 25. Proposer le questionnement d'un TP fourni à des élèves où il leur est proposé de modifier certains paramètres permettant de comparer les deux méthodes et la validité du cahier des charges. Vous préciserez les ressources disponibles pour les élèves et rédigerez aussi le document professeur précisant les moyens et les objectifs d'un tel TP.

5.1.2 Fonction de transfert

On note $H(p)$ la fonction de transfert de la double enveloppe avec la cuve dans le domaine de Laplace :

$$H(p) = \frac{T(p)}{P(p)}$$

Avec $P(p)$ la transformée de Laplace de la puissance apportée par la double enveloppe.

Et $T(p)$ la transformée de Laplace de la température produit.

Question 26. Montrer que sous certaines hypothèses que vous formulerez, la fonction de transfert de la double enveloppe peut s'écrire :

$$H(p) = \frac{1}{v_{1.d1.Ch1.p}}$$

Pour un échelon de puissance $P_0=100W$, donner l'équation $T(t)$ en prenant $T(0)=37^\circ C$. Critiquer le modèle.

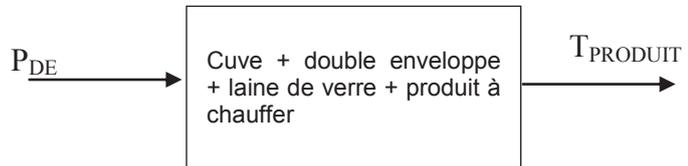
5.2 MODÈLE THERMIQUE ACAUSAL

5.2.1 Etablissement du modèle

Objectif : réaliser le modèle thermique de la cuve contenant le produit à chauffer avec la double enveloppe en utilisant les symboles d'un logiciel de modélisation acausale.

Le travail préparatoire du professeur doit permettre de développer la compétence C08.ee1.

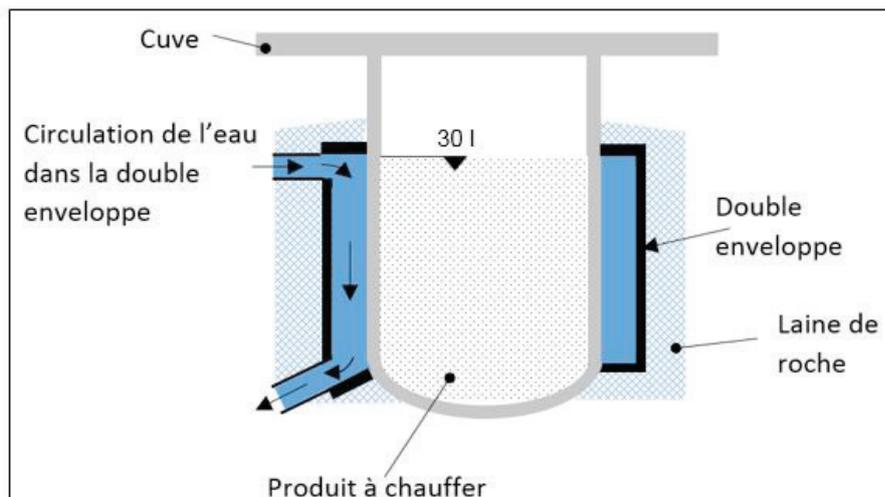
On propose de réaliser une modélisation des flux de chaleur dans le système sous la forme d'un schéma thermique réalisé avec un logiciel de modélisation acausale.



La modélisation s'effectue pour une température du produit de 37°C avec une température ambiante de 20°C .

La source de flux thermique est la puissance délivrée par la double enveloppe P_{DE} . On considère les chaleurs spécifiques et les conductivités thermiques constantes.

Données :



Produit à chauffer :

- Capacité thermique massique $C_P = 1 \text{ kcal.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Volume $V_P = 30 \text{ litres}$
- Masse volumique $\rho_P = 1 \text{ g / cm}^3$
- Température de départ : 37°C

Paroi cuve :

- Surface calorifugée échange avec la Double Enveloppe: $S_E = 0,371 \text{ m}^2$ pour une épaisseur $e_E = 4\text{mm}$
- Surfaces non calorifugées :
 - $S_{NC1} = 0,07 \text{ m}^2$, épaisseur $e_{NC1} = 28 \text{ mm}$
 - $S_{NC2} = 0,654 \text{ m}^2$, épaisseur $e_{NC2} = 4\text{mm}$

Paroi Double enveloppe :

- Épaisseur $e_{DE} = 4 \text{ mm}$
- Surface d'échange $S_{DE} = 0,371 \text{ m}^2$

Propriétés de l'acier de la cuve et de la double enveloppe :

- Matériau acier inoxydable 1-4404 densité $\rho_{acier} = 7,9 \text{ g.cm}^{-3}$
- Capacité thermique massique : $C_{acier} = 502,3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Conductivité thermique (conduction) : $\lambda_{acier} = 0,15 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Coefficient de convection : $h = 10000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

Isolant laine de roche :

- Epaisseur $e_L = 50 \text{ mm}$
- Conductivité thermique (conduction) $\lambda_L = 0,048 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Surface $S_L = 0,4 \text{ m}^2$

Température ambiante : 20°C.

On donne en annexe « modélisation acausale » toutes les informations utiles pour construire le modèle demandé.

Question 27. Rappeler la signification de la modélisation acausale.

Pour le modèle équivalent les capacités thermiques sont en J.K^{-1} et les résistances thermiques en K.W^{-1} . On définit les éléments suivants :

- C_P : capacité thermique du produit à chauffer (125 kJ.K^{-1})
- C_{CU} : capacité thermique de l'acier de la cuve ($24,04 \text{ kJ.K}^{-1}$)
- C_{DE} : capacité thermique de l'acier de la double enveloppe
- R_{DE} : résistance thermique par conduction de la paroi de la double enveloppe
- R_{CC} : résistance thermique par conduction de la paroi de la cuve calorifugée ($0,0713 \text{ K.W}^{-1}$)
- R_{NC} : résistance thermique par conduction de la paroi de la cuve non calorifugée ($0,04 \text{ K.W}^{-1}$)
- R_{LR} : résistance thermique par conduction de la laine de roche ($2,24 \text{ K.W}^{-1}$)
- R_{EDE} : résistance thermique par convection de l'eau et de la paroi de la double enveloppe
- R_{EC} : résistance thermique par convection de l'eau et la paroi de la cuve ($0,0027 \text{ K.W}^{-1}$)
- P_{DE} : puissance apportée par la double enveloppe en W
- T_A : température ambiante en K

On néglige la résistance thermique modélisant le transfert par convection entre la cuve et l'air ambiant et entre la laine de roche et l'air ambiant.

Question 28. En utilisant les données et l'annexe « modélisation acausale », calculer en J.K^{-1} la capacité thermique de l'acier de la double enveloppe C_{DE} .

Question 29. En utilisant les données et l'annexe « modélisation acausale », calculer R_{DE} la résistance thermique en K.W^{-1} par conduction de la paroi de la double enveloppe.

Question 30. En utilisant les données et l'annexe « modélisation acausale », calculer R_{EDE} la résistance thermique en $K.W^{-1}$ par convection de l'eau et la paroi de la double enveloppe.

Question 31. Les symboles « modélisation acausale » sont donnés en annexe. Identifier sur le document réponse DR1 « modélisation acausale », P_{DE} (sans sa valeur qui sera calculée à la question suivante), T_A (avec sa valeur), R_{CC} , R_{NC} , R_{DE} , R_{LR} , R_{EDE} , R_{EC} . Montrer T_P (température du produit) avec une flèche.

Question 32. La valeur de P_{DE} qui sera utilisée pour la simulation correspond aux déperditions en considérant la température de la double enveloppe et de la cuve à $37^\circ C$ (régime permanent). Calculer cette valeur et la reporter sur le document réponse DR1 « modélisation acausale ».

5.2.2 Exploitation du modèle

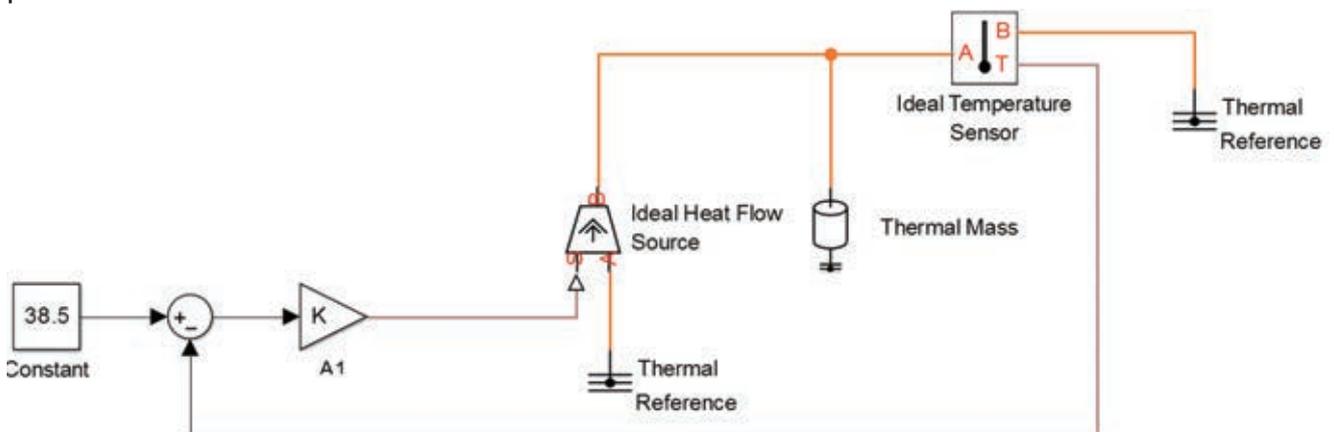
Question 33. La courbe du document réponse DR2 « identification fonction de transfert » donne l'évolution de la température du produit pour un échelon de 100 W dans la double enveloppe, en partant d'une température produit de $37^\circ C$. Identifier cette fonction de transfert par un premier ordre.

Question 34. Comparer avec la fonction de transfert de la question 26.

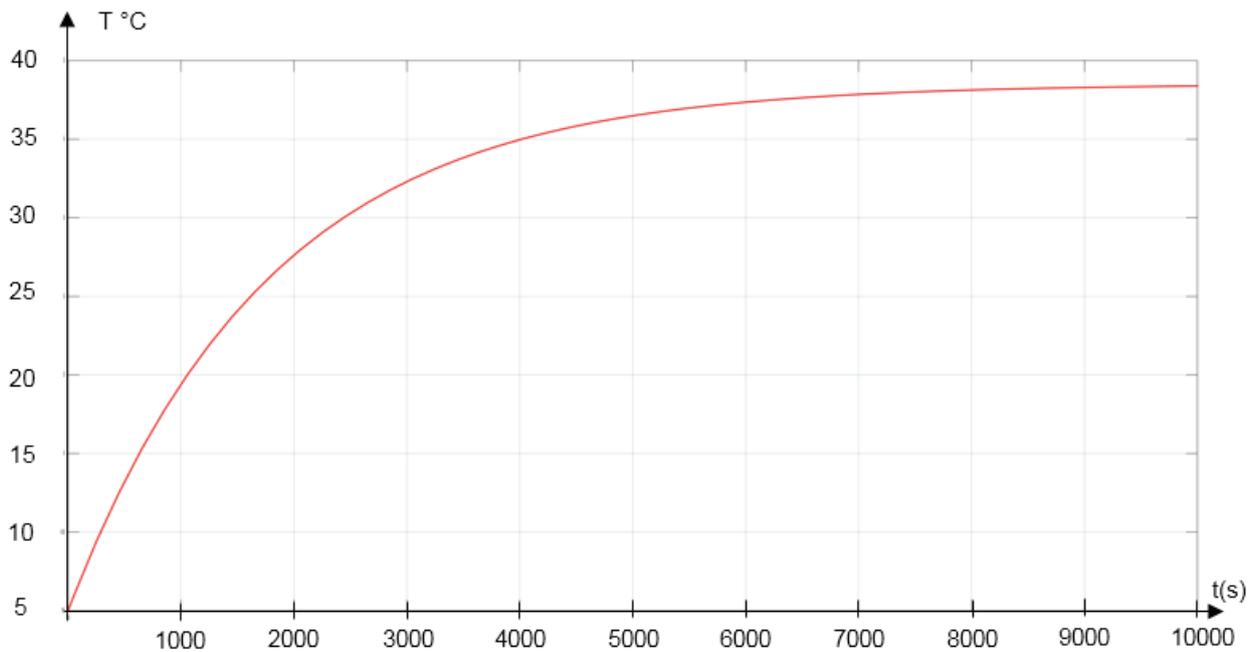
Question 35. Proposer une activité donnée à des élèves qui permette de faire le lien entre le modèle de la question 26 et le modèle de la question 31. Cette activité permet de travailler la compétence CO8. ee1.

- Indiquer les objectifs pédagogiques visés.
- Préciser la problématique proposée aux élèves durant cette activité afin d'atteindre les objectifs décrits précédemment.
- Rédiger le document donné aux élèves avec les réponses attendues.

Le modèle de connaissance des questions 17 à 20 peut être modélisé en acausal par le schéma ci-dessous.



La montée en température de 5°C à 35°C est la suivante :



Question 36. Modifier sur le document réponse DR1 « modélisation acausale » en utilisant une autre couleur le modèle thermique acausal de la question 31 afin que la puissance de la double enveloppe ne soit plus constante mais dépende de la température du produit. Vous préciserez la valeur du coefficient du gain A1 et son unité.

Question 37. Proposer le questionnement d'un TP fourni aux élèves permettant de comparer les modèles acausaux des questions 30 et ci-dessus. Préciser les ressources disponibles pour les élèves et rédiger aussi le document professeur précisant les moyens et les objectifs d'un tel TP.

6. ASSERVISSEMENT ET RÉGULATION DE TEMPÉRATURE

Le travail préparatoire du professeur doit permettre de développer la compétence CO8.ee2 chez les élèves.

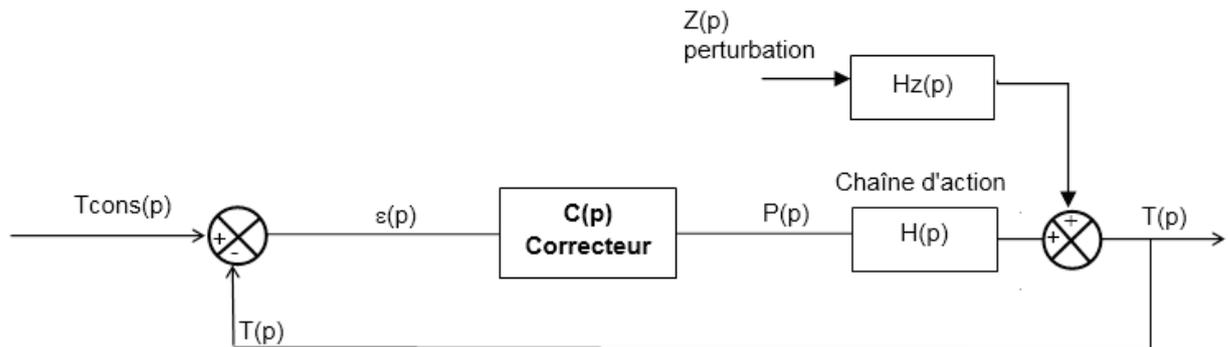
Le réglage de la température dans le cytotuteur est un point crucial dans la conduite du procédé.

L'automatisation complète des différentes opérations décrites plus haut impose à la commande de température des performances satisfaisantes dans toutes les phases de fonctionnements (stérilisation, refroidissement, préchauffage, culture...).

Question 38. On parle de robustesse de la commande, définir ce terme. Rappeler la signification des termes suivants : régulation, asservissement. Dans quelles opérations chacune de ces commandes sera nécessaire ?

6.1 FONCTION DE TRANSFERT

On modélise la commande de la température par les schémas blocs suivants :



Question 39. Exprimer les fonctions de transfert en boucle fermée définies par :

$$F1(p) = \frac{T(p)}{Tcons(p)} \text{ et } F2(p) = \frac{T(p)}{Z(p)}$$

Question 40. Exprimer $T(p)$ en fonction de $Tcons(p)$ et $Z(p)$.

6.2 MODÈLE DE COMPORTEMENT EN ASSERVISSEMENT

On s'intéresse dans cette partie à la phase de préchauffage qui a été précédemment définie : il s'agit de porter le produit de 5°C à 37°C , sans dépassement.

$$H(p) = \frac{H_0}{1 + \tau \cdot p}$$

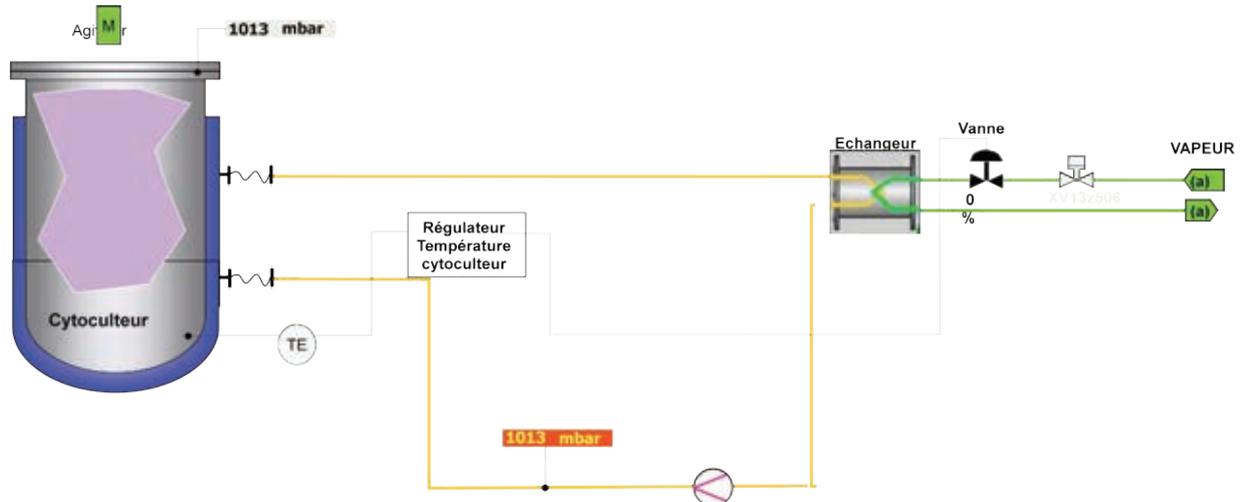
avec $H_0 = 0.04^{\circ}\text{C/W}$ et $\tau = 13\,000\text{s}$

On souhaite diviser par 5 le temps de réponse en modélisant le système en boucle fermée par un modèle du 1^{er} ordre, appelé modèle de référence $R(p)$.

Question 41. Exprimer $C(p)$ en fonction de $R(p)$ et $H(p)$, puis en fonction de τ et de p . De quel type de correcteur s'agit-il ?

6.3 PREMIÈRE STRATÉGIE DE COMMANDE

La structure réellement envisagée pour commander la puissance dans la double enveloppe est la suivante.



Le liquide caloporteur de la double enveloppe est réchauffé par un échangeur qui est déporté spatialement par rapport au cytotoculteur. Le circuit primaire de cet échangeur est un circuit de vapeur. Il existe donc un retard entre la commande de la vanne de vapeur et la puissance dans la double enveloppe, on appelle Θ ce retard.

On prendra maintenant la fonction de transfert.

$$Hr(p) = \frac{T(p)}{V(p)} = \frac{K \cdot e^{-\theta p}}{1 + \tau \cdot p}$$

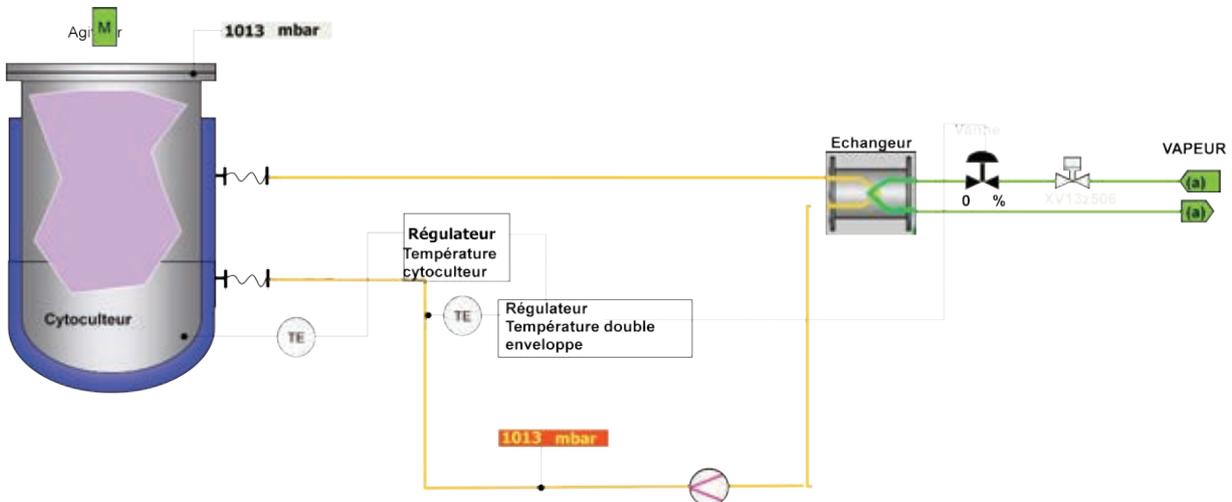
Où $V(p)$ est la transformée de Laplace de la commande de la vanne.

On souhaite que la commande permette d'aboutir au même modèle de référence $R(p)$ en boucle fermée (définie en 6.2).

Question 42. Exprimer $C(p)$ en fonction de $R(p)$ et $Hr(p)$, puis en fonction de τ , θ et de p . Ce correcteur est-il réalisable ? Quelles conclusions pouvez-vous en tirer sur le modèle de référence ?

6.4 DEUXIÈME STRATÉGIE : RÉGULATION CASCADE

Afin de diminuer le retard, on contrôle la température de la double enveloppe par une mesure de température à proximité de l'échangeur. Pour cela on réalise deux boucles de régulation en cascade : le régulateur de température du cytotoculteur fournit la consigne au régulateur de température de la double enveloppe.

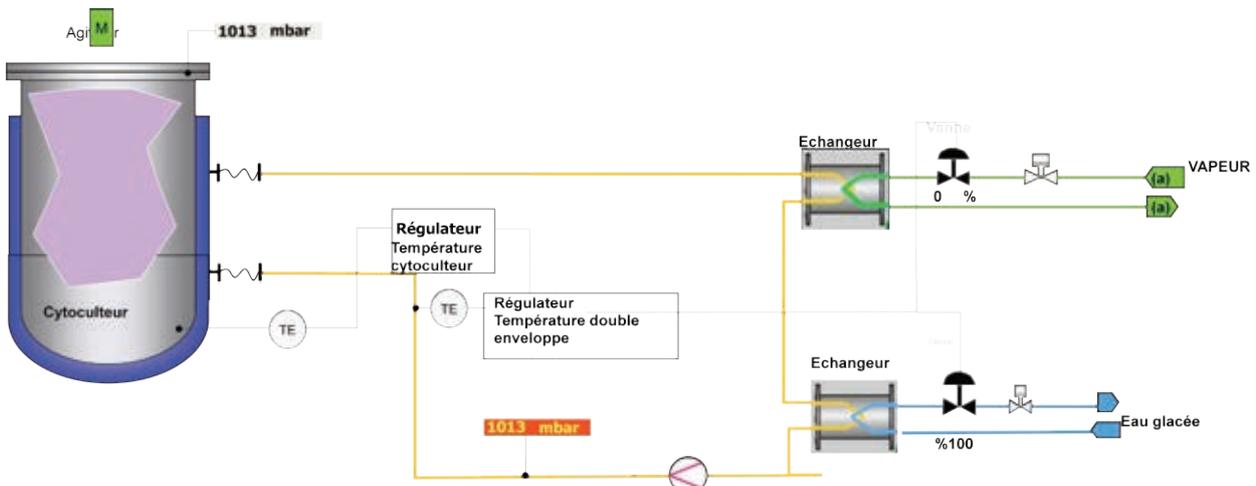


Question 43. Tracer le nouveau schéma bloc de la commande en température sur le document réponse DR3.

6.5 TROISIÈME STRATÉGIE : RÉGULATION À PARTAGE D'ÉCHELLE

Certaines phases de fonctionnement nécessitent un refroidissement rapide du cytotoculteur notamment après une « stérilisation ».

Lorsque le produit est trop chaud il faut aussi pouvoir le refroidir avec le fluide de la double enveloppe. On introduit donc un deuxième échangeur sur le circuit de la double enveloppe. Il est alimenté en eau glacée.



La commande est toujours basée sur deux régulateurs en cascade. Le régulateur « maître » de température du cytotoculteur fournit la consigne au régulateur « esclave » de température de la double enveloppe. Suivant la valeur de la sortie du régulateur esclave, un bloc de partage d'échelle (en anglais « split range »), permet de piloter la vanne d'eau glacée ou la vanne de vapeur.

L'ouverture des vannes est proportionnelle à leur commande.

$C_{\text{vanne}} = 0\%$: vanne fermée

$C_{\text{vanne}} = 100\%$: vanne ouverte

Question 44. Compléter le nouveau schéma bloc de la commande en température et la caractéristique du bloc « Split range » sur le document réponse DR4.

Question 45. Vous disposez des modèles de simulation des stratégies 1, 2 et/ou 3. Vous souhaitez développer chez vos élèves la compétence C008.ee2, proposer un scénario pour atteindre cet objectif.

7. ICM : INCERTITUDE CHAÎNE DE MESURE.

Les biologistes demandent de ne pas dépasser $\pm 0.2^\circ\text{C}$ erreur de mesure tolérée (EMT) sur la température à l'intérieur du cytotoculteur.

Le document ressource « incertitude de mesure » est à consulter, il développe une vision probabiliste des phénomènes qui impactent la mesure. Il s'agit là encore d'une modélisation avec des outils propres aux statistiques.

Le capteur de température est un élément clé de la chaîne d'acquisition, mais pas le seul car il faut compter avec la chaîne complète d'acquisition de la mesure (du capteur jusqu'à l'automate).

7.1 CAPTEUR DE TEMPÉRATURE

Cette partie doit permettre de choisir le capteur le mieux adapté au respect du cahier des charges.

Comparaison de trois sondes de température Pt100 F0.15 (classe A), F0.1(1/3 classe B) et F0.3 (classe B) dont les documentations techniques sont données en annexe.

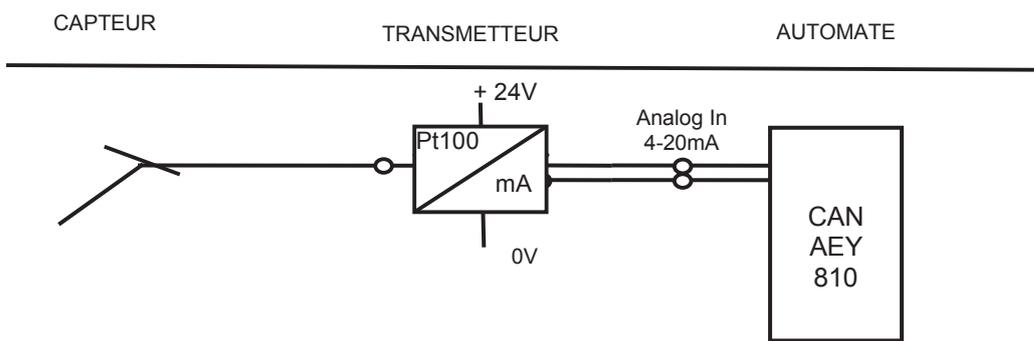
Question 46. Compléter le document réponse DR5 (1^{ère} colonne) en relevant pour chacune des sondes la formule donnant la tolérance maximale en fonction de la température.

Question 47. La tolérance ici donnée correspond à un intervalle à 2σ . Compléter le document réponse DR5 en précisant la plage de température contenant 95% des mesures à 100° puis à 37°C pour chacune des trois sondes. Donner l'écart type sur les mesures à 37°C .

Question 48. Au vu du cahier des charges, choisir en justifiant la sonde de température.

7.2 INCERTITUDE SUR LA CHAÎNE DE MESURE

La chaîne de mesure de la température est la suivante :



Température ambiante
(local automate): 25°C

Question 49. Afin de calculer l'incertitude de la chaîne de mesure (tableau du document réponse DR5),

- rechercher les informations manquantes dans la documentation constructeur donnée en annexe,
- faire les calculs manquants dans le tableau,
- conclure quant à l'exigence des biologistes.

Question 50. En quoi une approche interdisciplinaire, peut-elle être utile en termes d'apprentissage et comment l'envisageriez-vous ?

8. SYNTHÈSE PÉDAGOGIQUE

La séquence pédagogique se situe en enseignement de spécialité énergie et environnement en terminale STI2D.

Question 51. Choisir le ou les centres d'intérêt à associer aux activités de la séquence et permettant de travailler sur les problématiques mises en évidence dans le sujet. Justifier votre choix.

Question 52. En dehors du dossier proposé par ce sujet, quels autres supports pourraient contribuer à développer les centres d'intérêts retenus ?

Question 53. Proposer, sans rédiger les documents élèves, une trame d'évaluation sommative pour l'ensemble de la classe à l'issue de la séquence. Les objectifs visés devront être clairement énoncés.

Question 54. Faire une analyse critique de la séquence proposée en indiquant les difficultés (matérielles, organisationnelles, ...) susceptibles d'être rencontrées au regard du cadre imposé par le sujet.

ANNEXE : « DIMENSIONNEMENT ÉCHANGEUR »

Le coefficient de transfert par convection dépend des nombres adimensionnels Re, Nu, Pr.

Nombre de Nusselt dans le cas d'un écoulement turbulent entre deux plaques :

<p>Formule de Colburn :</p> $Nu = 0,023 \times Re^{0,8} \times Pr^{0,33}$ $Nu = \frac{h \times d \times 2}{\lambda_F}$	<p>Re : nombre de Reynolds Pr : nombre de Prandtl</p> <p>λ_F : conductivité thermique du fluide ($W.m^{-1}.K^{-1}$) d : distance entre deux plaques (m) h : coefficient de transfert par convection ($W.m^{-2}.K^{-1}$)</p>
--	--

Nombre de Reynolds pour écoulement turbulent et laminaire :

$Re = \frac{\rho \times v \times 2 \times d}{\mu}$	<p>ρ : masse volumique du fluide ($kg.m^{-3}$) v : vitesse du fluide ($m.s^{-1}$) d : distance entre deux plaques (m) μ : viscosité dynamique ($kg.m^{-1}.s^{-1}$)</p>
--	--

Nombre de Prandtl :

$Pr = \frac{\mu \times C_p}{\lambda_F}$	<p>μ : viscosité dynamique ($kg.m^{-1}.s^{-1}$) C_p : capacité calorifique du fluide ($J.kg^{-1}.K^{-1}$) λ_F : conductivité thermique du fluide ($W.m^{-1}.K^{-1}$)</p>
---	--

Données :

	Fluide chaud : vapeur 3 bars	Fluide froid : eau (35 – 40 °C)
Masse volumique ρ	2163 $kg.m^{-3}$	994 $kg.m^{-3}$
Viscosité dynamique μ	$14 \times 10^{-6} kg.m^{-1}.s^{-1}$	$720 \times 10^{-6} kg.m^{-1}.s^{-1}$
Conductivité thermique λ_F	0,691 $W.m^{-1}.K^{-1}$	0,607 $W.m^{-1}.K^{-1}$
Capacité calorifique C_p	2737 $J.kg^{-1}.K^{-1}$	4178 $J.kg^{-1}.K^{-1}$
Débit D	800 $kg.h^{-1}$	1920 $l.h^{-1}$
Section de passage du fluide S_p	0,36 m^2	0,36 m^2
Température d'entrée	Tce = 140°C	Tfe = 38°C
Température de sortie	Tcs = 136°C	Tfs = 40°C

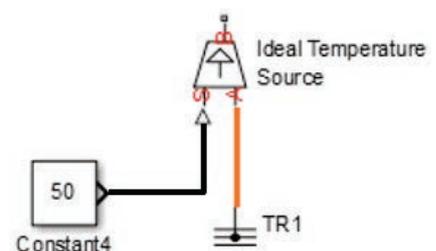
ANNEXE : « MODÉLISATION ACAUSALE »

La modélisation acausale thermique utilise les symboles suivants :

Symbole	Désignation	
	R_{TH} : Transfert de chaleur par conduction	<p>Ce bloc représente un transfert de chaleur par conduction à travers un matériau selon la loi de Fourier :</p> $T_A - T_B = R_{TH} \times P$ <p>avec P en W, T_A et T_B en K et R_{TH} en $K.W^{-1}$</p> <p>On a $R_{TH} = e / (\lambda \times S)$ avec e épaisseur du matériau (m), λ conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$) et S surface en m^2.</p>
	R_{TH} : transfert de chaleur par convection	<p>Ce bloc représente un transfert de chaleur par convection entre deux corps par un fluide en mouvement. Le transfert applique la loi de Newton :</p> $T_A - T_B = R_{TH} \times P$ <p>avec P en W, R_{TH} en $K.W^{-1}$ et T_A, T_B en K.</p> <p>On a $R_{TH} = 1 / (h \times S)$ avec h coefficient de convection ($W.m^{-2}.K^{-1}$) et S surface en m^2.</p>
	C_{TH} : capacité thermique	<p>Ce bloc représente la capacité d'un matériau de stocker de l'énergie thermique. Le modèle est utilisé avec l'équation $Q = C \times m \times dT / dt$ avec $C_{TH} = m \times C$ (C_{TH} en $J.K^{-1}$, m en kg et C en $J.K^{-1}.kg^{-1}$)</p>
	Masse thermique	<p>Référence thermique qui représente le $0^\circ K$ si on travaille en Kelvin ou le $0^\circ C$ si on travaille en Celsius</p>
	Capteur de température	<p>Ce bloc mesure la différence de température entre les points A et B. Il donne la valeur $T = T_A - T_B$</p>

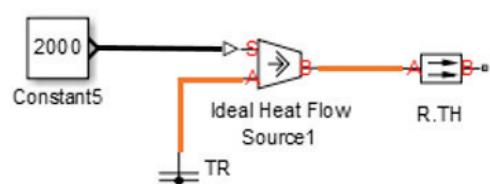
Source de température

La source de température impose une différence de température entre deux points du schéma. Par exemple, ci-contre, la source de température impose $50^\circ K$ en sortie du générateur (par rapport à la référence $0^\circ K$) ou $50^\circ C$ en sortie (par rapport à une référence de $0^\circ C$)



Source de flux thermique

Dans le schéma ci-contre, la source de flux thermique impose un flux thermique de $2000W$ dans la résistance thermique.



DOCUMENT RESSOURCE

« INCERTITUDE DE MESURE »

Ce guide a été inspiré du document disponible sur éduscol, *Ressources pour le lycée général et technologique « Mesure et incertitude »*.

1. DÉFINITIONS « MESURE »

Précisons quelques termes de vocabulaire du domaine de la métrologie :

Mesurage : ensemble d'opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur.

Si l'on répète le mesurage, on obtient une série de valeurs $y_1, y_2, y_3...$ que l'on considère comme les valeurs prises par une variable aléatoire Y .

Mesurande : grandeur particulière soumise à mesurage (longueur, masse, intensité,...).

« Valeur vraie » d'un mesurande : mesure que l'on obtiendrait par un mesurage parfait. On ne la connaît pas et on parle également de « valeur théorique » que l'on note y_0 .

Grandeur d'influence : grandeur qui n'est pas le mesurande mais qui a un effet sur le résultat du mesurage.

Erreur : Si y_i est le résultat d'un mesurage et y_0 la « valeur vraie » du mesurande, l'erreur sur le résultat est le nombre $e_i = y_i - y_0$.

Ainsi l'erreur de mesure est une variable aléatoire E .

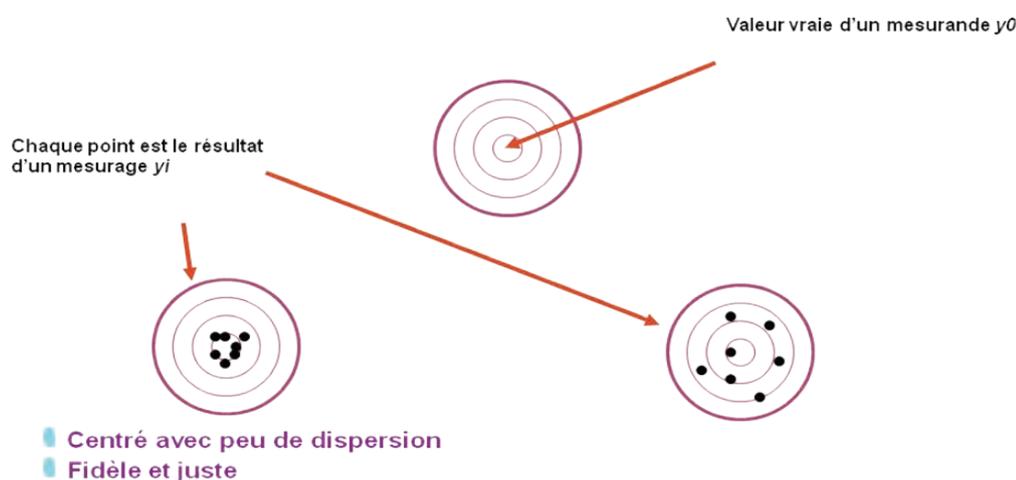
On peut ainsi modéliser le mesurage par : $Y = y_0 + E$.

L'hypothèse fondamentale du traitement probabiliste de l'erreur est que la variable E obéit à une loi de probabilité « bien définie ».

L'objet du calcul d'incertitude sera de déterminer :

- les paramètres de la loi de probabilité de E .
- un intervalle dont on puisse s'attendre à ce qu'il comprenne une fraction élevée des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande.

ILLUSTRATION



2. INCERTITUDE

2.1 DÉFINITIONS

Le mot incertitude signifie doute; l'incertitude du résultat d'un mesurage reflète l'impossibilité de connaître exactement la valeur du mesurande.

Incertitude : paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient être raisonnablement attribuées au mesurande.

Notion d'incertitude-type

Nous avons vu que le mesurage peut être modélisé par une variable aléatoire Y d'espérance y_0 et que l'on cherche à caractériser la dispersion des valeurs que peut prendre cette variable aléatoire. Une mesure de cette dispersion peut être obtenue à partir de l'écart-type de la variable aléatoire Y .

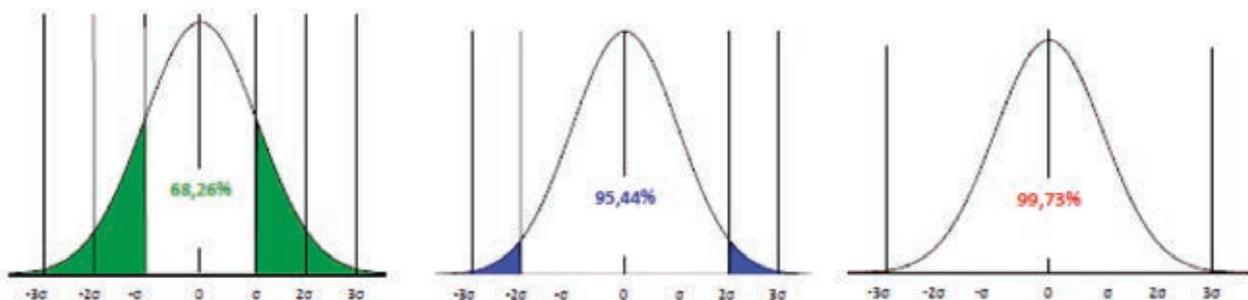
La détermination de l'incertitude sur le mesurage va être exprimée en fonction de l'écart-type de la variable aléatoire Y .

L'écart-type de Y est appelé incertitude-type sur le résultat du mesurage.

On note généralement $u(y)$ cette incertitude-type sur Y .

L'essentiel de la démarche va consister à déterminer la loi de probabilité suivie par Y (ou par E) et à estimer la valeur de l'écart-type de Y (ou de E).

2.2 INCERTITUDE DE TYPE A : LOIS NORMALES



allure de la densité de $E = Y - y_0$

Si la variable E suit une loi normale de moyenne y_0 et d'écart-type σ on a alors :

- Probabilité $(-\sigma \leq E \leq \sigma) \approx 0,68$
- Probabilité $(-2\sigma \leq E \leq 2\sigma) \approx 0,95$
- Probabilité $(-3\sigma \leq E \leq 3\sigma) \approx 0,997$

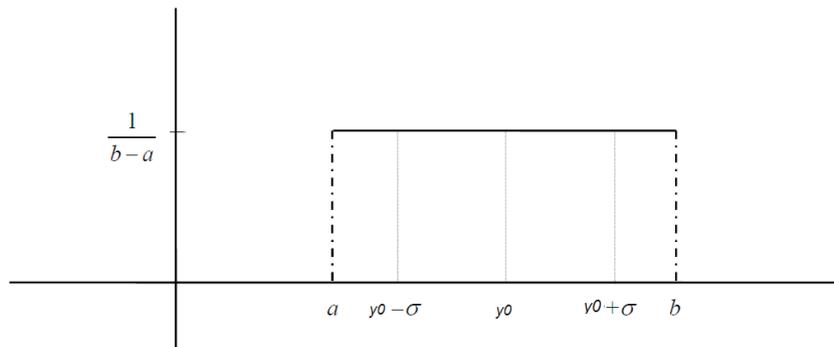
Cette dernière inégalité indique que quasiment la totalité des données sont situées entre -3σ et 3σ .

On dit parfois que l'étendue des valeurs représente 6σ , ce qui permet de donner rapidement une estimation de l'écart-type en divisant cette étendue par 6.

2.3 INCERTITUDE DE TYPE B : LOIS RECTANGLES

La loi rectangulaire ou uniforme est utilisée souvent en calcul d'incertitude, lorsqu'on ne connaît qu'une majoration de l'erreur.

Ainsi si on peut raisonnablement faire l'hypothèse que les erreurs se situent entre deux nombres a et b , la loi rectangulaire sur $[a, b]$ (elle vaut 1 entre a et b et 0 ailleurs) est de toutes les lois définies sur ce même intervalle $[a, b]$, celle qui a le plus grand écart-type ; pour cela on la nomme parfois la « loi du pire » en ce sens qu'on ne minimise pas l'écart-type qui caractérise l'incertitude-type.



Allure de la densité Y
Ecart type
 $\sigma = (b - a)/2\sqrt{3}$

2.4 MÉTHODOLOGIE

2.4.1 Incertitude composée

Dans la pratique il existe de nombreuses sources possibles d'incertitude dans un mesurage générant des composantes que nous supposerons ici indépendantes.

Le mesurage d'une grandeur Y peut être modélisé par $Y = y_0 + E_1 + E_2 + \dots + E_n$ où les variables représentent les différentes composantes **indépendantes** de l'erreur.

Un résultat statistique montre que $u^2(Y) = u^2(E_1) + u^2(E_2) + \dots + u^2(E_n)$.

2.4.2 Incertitude élargie

Rappelons la problématique développée :

Dans les chapitres précédents, on a modélisé la mesure d'une grandeur Y comme variable aléatoire, et on a déterminé une approximation de l'écart-type de cette variable que l'on a noté $u(y)$.

L'intention de départ est de fournir, autour du résultat d'un mesurage, un intervalle dont on puisse s'attendre à ce qu'il contienne une fraction élevée de la distribution des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande Y .

Après l'estimation de l'écart-type de Y , il reste à estimer la loi de probabilité suivie par cette variable.

Idéalement, on aimerait déterminer un nombre k tel que si Y est estimé par y avec une incertitude $U(y) = ku(y)$, alors on peut affirmer que : $y - U(y) \leq Y \leq y + U(y)$ avec une probabilité p proche de 1.

$U(y)$ notée également U est appelée incertitude élargie sur Y .

DOCUMENT RESSOURCE

« CONSTRUCTEUR »

1. CAPTEUR DE TEMPÉRATURE

Function and system design

Measuring principle

In the Platinum RTD (Resistance Temperature Detector) thermometers the sensing element consists of an electrical resistance with value of 100Ω at 0°C (called Pt100, in compliance with standard IEC 60751), which increases at higher temperatures according to a coefficient characteristic of the resistor material (platinum). In industrial thermometers that comply with the IEC 60751 standard, the value of this coefficient is $\alpha = 3.85 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, calculated between 0 and 100°C .

Equipment architecture

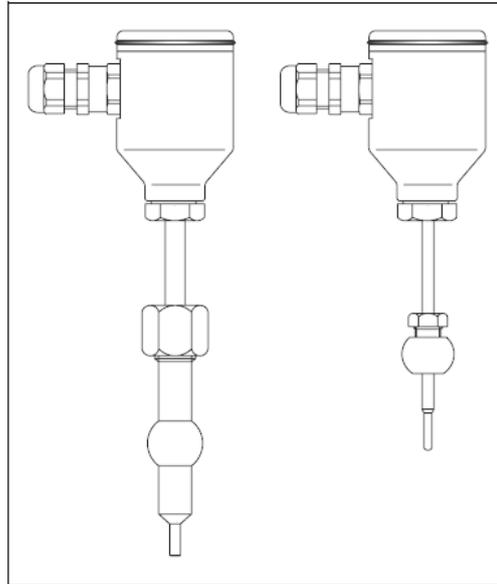
The Omnigrad M TR47 and TR48 temperature assemblies are made up of a measurement probe, with (TR47) or without (TR48) a thermowell, and a housing (head), which may contain a transmitter or the terminals for the electrical connection.

In the TR47, the probe is a sensing insert, which is placed inside the thermowell and spring loaded to its base in order to improve heat transfer.

As in the TR48, the sensing element (Pt 100) is positioned close to the tip of the probe.

The thermowell (TR47) is manufactured from a solid stainless steel bar, which when welded correctly to the plant, is able to withstand very high operating pressures. The final (sensing) part of the well is reduced (stepped).

The sheath of the probe in the TR48 is obtained from a 6 mm pipe, which tapers to 4.5 mm in the last 18 mm of the stem.



The process connection in the TR48 is a fixed position compression fitting and its external spherical surface must be welded onto the plant. The press-fit effect is obtained via an internal sealing ring (sleeve).

Both TR47 and TR48 are built to 3-A[®] design criteria, which allow the sensor to withstand any stress caused by CIP (Cleaning In Place) and SIP (Sterilization In Place) processes.

The electrical structure of the instruments always complies with IEC 60751 standard rules. The housing can be of different types and materials (plastic, painted aluminium, stainless steel). The way in which it fits to the rest of the probe and the gland for the cable entry ensures a minimum grade of IP65 (Ingress Protection).

The TR47 is supplied with or without the thermowell. This option is particularly important when the well must be mounted on the plant prior to the purchase of the measuring instruments.

TR47 (left) and TR48 (right)

Measurement range

According to IEC 60751:

- TR47: $-50 \dots 400^\circ\text{C}$ ($-58 \text{ }^\circ\text{F} \dots 752 \text{ }^\circ\text{F}$)
- TR48: $-50 \dots 200^\circ\text{C}$ ($-58 \text{ }^\circ\text{F} \dots 392 \text{ }^\circ\text{F}$)

Accuracy RTD corresponding to IEC 60751

Accuracy		RTD corresponding to IEC 60751		Characteristics
Class	max. Tolerances (°C)	Temperature range		
RTD maximum error type TF - range: -50 to +400 °C				
F0.15 (Cl. A)	1) $0.15 \pm 0.002 \cdot t ^{1.1}$	-50 °C to +250 °C		
F0.1 (1/3 Cl. B)	$0.10 \pm 0.0017 \cdot t ^{1.1}$	0 °C to +150 °C		
F0.3 (Cl. B)	$0.3 \pm 0.005 \cdot t ^{1.1}$	-50 °C to +400 °C		

1. |t| = absolute value °C



Note!

For measurement errors in °F, calculate using equations above in °C, then multiply the outcome by 1.8.

2. TRANSMETTEUR DE TEMPÉRATURE

Information technique

iTEMP[®] TMT180

Transmetteur de température
pour thermorésistance Pt100, réglable via PC,
pour montage en tête de sonde forme B



Domaines d'application

- Transmetteur de tête de sonde programmable PC (PCP) pour la conversion du signal d'entrée Pt100 en un signal de sortie analogique 4...20 mA pouvant être mis à l'échelle
- Entrée : thermorésistance Pt100
- Configuration en ligne via PC avec kit de configuration et logiciel PC

Principaux avantages

- Programmable par PC pour signal d'entrée Pt100
- Technique 2 fils, sortie analogique 4 à 20 mA
- Précision élevée sur l'ensemble de la gamme de température
- Signalisation de panne en cas de rupture ou court-circuit du capteur, réglable selon NAMUR NE43
- CEM selon CEI 61 326, CE
- Configuration en ligne pendant la mesure avec connecteur SETUP
- Réglage de la gamme de mesure spécifique au client
- Agrément marine GL (Germanischer Lloyd)
- Agrément UL selon UL 3111-1
- CSA GP (application générale)

Principe de fonctionnement et construction

Principe de mesure	Mesure électronique et conversion de signaux d'entrée Pt100 pour la mesure de température industrielle.
Ensemble de mesure	Le transmetteur de tête de sonde ITEMP [®] TMT180 est un transmetteur 2 fils avec sortie analogique et entrée mesure pour Pt100 en technique 2, 3 ou 4 fils. Le réglage de l'appareil est réalisé à l'aide d'un kit de configuration et du logiciel de configuration gratuit ReadWin [®] 2000.

Entrée

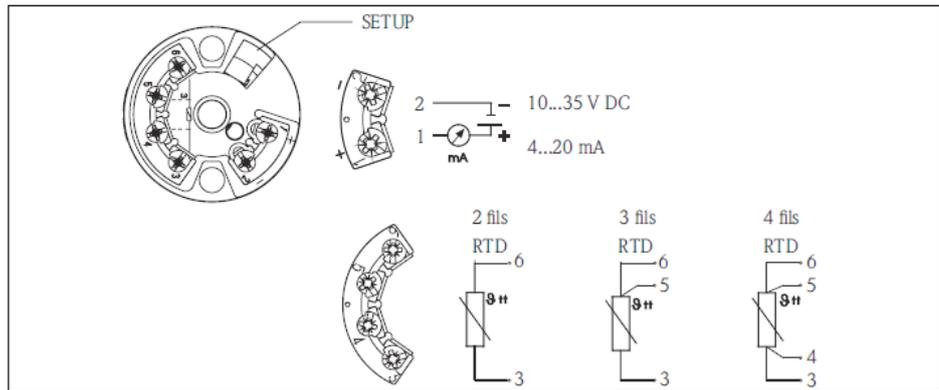
Grandeur de mesure	Température (transmission linéaire en fonction de la température)												
Gamme de mesure	<table border="1"><thead><tr><th>Désignation</th><th>Limites de gamme de mesure</th><th>Etendue de mesure min.</th></tr></thead><tbody><tr><td>Pt100</td><td>-200 à +650 °C (-328 à +1202 °F)</td><td>10 K</td></tr><tr><td>selon CEI 60751</td><td>-50 à +250 °C (-58 à +482 °F)</td><td>10 K</td></tr><tr><td></td><td>-200 à +250 °C (-328 à +482 °F)</td><td>10 K</td></tr></tbody></table> <ul style="list-style-type: none">Type de raccordement : 2, 3 ou 4 fils dans le cas d'un circuit 2 fils, compensation de la résistance de ligne possible (0 à 20 Ω)Résistance de câble : résistance de câble capteur max. 11 Ω par câbleCourant de capteur : ≤ 0,6 mA	Désignation	Limites de gamme de mesure	Etendue de mesure min.	Pt100	-200 à +650 °C (-328 à +1202 °F)	10 K	selon CEI 60751	-50 à +250 °C (-58 à +482 °F)	10 K		-200 à +250 °C (-328 à +482 °F)	10 K
Désignation	Limites de gamme de mesure	Etendue de mesure min.											
Pt100	-200 à +650 °C (-328 à +1202 °F)	10 K											
selon CEI 60751	-50 à +250 °C (-58 à +482 °F)	10 K											
	-200 à +250 °C (-328 à +482 °F)	10 K											

Sortie

Signal de sortie	analogique 4 à 20 mA, 20 à 4 mA
Mode de transmission	linéaire en température
Signal de panne	<ul style="list-style-type: none">Dépassement par défaut de la gamme de mesure : chute linéaire jusqu'à 3,8 mADépassement par excès de la gamme de mesure : montée linéaire jusqu'à 20,5 mARupture de capteur ; court-circuit de capteur : ≤ 3,6 mA ou ≥ 21,0 mA (pour un réglage ≥ 21,0 mA un courant de sortie de ≥ 21,5 mA est garanti)
Charge	max. $(V_{\text{alimentation}} - 10 \text{ V}) / 0,022 \text{ A}$ (sortie courant)
Consommation propre	≤ 3,5 mA
Limitation de courant	≤ 23 mA
Temporisation au démarrage	4 s (pendant la mise sous tension $I_0 = 3,8 \text{ mA}$)

Alimentation

Raccordement électrique



Occupation des bornes du transmetteur en tête de sonde

A0018204-DE

Tension d'alimentation $U_b = 10$ à 35 V DC, protection contre les inversions de polarité

Ondulation résiduelle Ondulation résiduelle $U_{ss} \leq 3$ V pour $U_b \geq 13$ V, $f_{max.} = 1$ kHz

Précision de mesure

Temps de réponse 1 s

Conditions de référence Température d'étalonnage : $+25$ °C (77 °F) ± 5 K (± 9 K)

Ecart de mesure Les indications sur la précision de mesure sont des valeurs typiques et correspondent à un écart standard de $\pm 3\sigma$ (équation de Gauss), c.à.d. 99,8% de toutes les valeurs mesurées atteignent les valeurs indiquées ou de meilleures valeurs. Les % se rapportent à l'étendue de mesure réglée (la valeur à considérer est la plus élevée).

	Désignation	Précision mesure
Thermorésistance RTD	Pt100 -200 à +650 °C (-328 à +1202 °F)	0,2 K ou 0,08%
	Pt100 ¹ -50 à +250 °C (-58 à +482 °F)	0,1 K ou 0,08%
	Pt100 ¹ -200 à +250 °C (-328 à +482 °F)	0,2 K ou 0,08%

1. en option

Effet de la tension d'alimentation $\leq \pm 0,01\%/V$ écart de 24 V¹

Effet de la température ambiante (dérive de température) Thermorésistance (Pt100) :
 $T_d = \pm (15 \text{ ppm/K} * (\text{valeur de fin d'échelle} - \text{valeur de début d'échelle}) + 50 \text{ ppm/K} * \text{gamme de mesure réglée}) * \Delta \vartheta$

$\Delta \vartheta =$ écart de la température ambiante par rapport aux conditions de référence ($+25$ °C ± 5 K).

3. CARTE D'ENTRÉE ANALOGIQUE AUTOMATE

Caractéristiques du module TSX AEY 810

Introduction Dans cette partie vous sont présentées les caractéristiques générales du module TSX AEY 810 et les caractéristiques de ses entrées analogiques.

Caractéristiques générales Ce tableau présente les caractéristiques générales du module TSX AEY 810 :

Types d'entrées	Entrées haut niveau isolées
Nature des entrées	Tension / Courant
Nombre de voies	8
Temps de cycle d'acquisition : <ul style="list-style-type: none"> ● Rapide (acquisition périodique des voies déclarées utilisées) ● Normale (acquisition périodique de toutes les voies) 	(Nombre de voies utilisées + 1) x 3,3 ms 29,7 ms
Convertisseur Analogique / Numérique	16 bits (49090 points en tension / 24545 points en courant)
Filtrage numérique	1 ^{ère} ordre (Constante de temps de 0 à 3,82s)
Isolement : <ul style="list-style-type: none"> ● entre voies ● entre voies et bus ● entre voies et terre 	+/- 200 VDC 1000 Veff. 1000 Veff.
Surtension max. autorisé sur les entrées	+/- 30 V en tension +/- 30 mA en courant
Puissance dissipée max.	3,15 W
Normes	IEC1131, CSA222, UL508

Gamme de mesures Ce tableau présente les gammes de mesures traitées par les entrées analogiques du module TSX AEY 810 :

Gamme de mesure	+/- 10 V et 0..10 V	0..5 V et 1..5 V	0..20 mA et 4..20 mA
Pleine échelle (PE)	10 V	5 V	20 mA
Résolution	0,406 mV	0,203 mV	812 nA
Impédance d'entrée en tension	10 MOhms	10 MOhms	250 Ohms
Erreur max. à 25 °C	0,244 % de PE	0,13 % de PE	0,142 % de PE
Erreur max. de 0 à 60 °C	0,305 % de PE	0,191 % de PE	0,212 % de PE
Dérive en température	15,3 ppm/°C	15,3 ppm/°C	17,5 ppm/°C

DOCUMENT RESSOURCE : PROGRAMME DES ENSEIGNEMENTS TECHNOLOGIQUES COMMUNS DE STI2D

Les enseignements technologiques communs

A - Objectifs et compétences des enseignements technologiques communs du baccalauréat STI2D

	Objectifs de formation	Compétences attendues
Société et développement durable	O1 - Caractériser des systèmes privilégiant un usage raisonné du point de vue développement durable	CO1.1. Justifier les choix des matériaux, des structures d'un système et les énergies mises en œuvre dans une approche de développement durable CO1.2. Justifier le choix d'une solution selon des contraintes d'ergonomie et d'effets sur la santé de l'homme et du vivant
	O2 - Identifier les éléments permettant la limitation de l'impact environnemental d'un système et de ses constituants	CO2.1. Identifier les flux et la forme de l'énergie, caractériser ses transformations et/ou modulations et estimer l'efficacité énergétique globale d'un système CO2.2. Justifier les solutions constructives d'un système au regard des impacts environnementaux et économiques engendrés tout au long de son cycle de vie
Technologie	O3 - Identifier les éléments influents du développement d'un système	CO3.1. Décoder le cahier des charges fonctionnel d'un système CO3.2. Évaluer la compétitivité d'un système d'un point de vue technique et économique
	O4 - Décoder l'organisation fonctionnelle, structurelle et logicielle d'un système	CO4.1. Identifier et caractériser les fonctions et les constituants d'un système ainsi que ses entrées/sorties CO4.2. Identifier et caractériser l'agencement matériel et/ou logiciel d'un système CO4.3. Identifier et caractériser le fonctionnement temporel d'un système CO4.4. Identifier et caractériser des solutions techniques relatives aux matériaux, à la structure, à l'énergie et aux informations (acquisition, traitement, transmission) d'un système
	O5 - Utiliser un modèle de comportement pour prédire un fonctionnement ou valider une performance	CO5.1. Expliquer des éléments d'une modélisation proposée relative au comportement de tout ou partie d'un système CO5.2. Identifier des variables internes et externes utiles à une modélisation, simuler et valider le comportement du modèle CO5.3. Évaluer un écart entre le comportement du réel et le comportement du modèle en fonction des paramètres proposés
Communication	O6 - Communiquer une idée, un principe ou une solution technique, un projet, y compris en langue étrangère	CO6.1. Décrire une idée, un principe, une solution, un projet en utilisant des outils de représentation adaptés CO6.2. Décrire le fonctionnement et/ou l'exploitation d'un système en utilisant l'outil de description le plus pertinent CO6.3. Présenter et argumenter des démarches, des résultats, y compris dans une langue étrangère

DOCUMENT RESSOURCE : PROGRAMME DES ENSEIGNEMENTS TECHNOLOGIQUES COMMUNS DE STI2D

3.2 Constituants d'un système

3.2.1 Transformateurs et modulateurs d'énergie associés				<i>Seuls les réducteurs à engrenage droit et à axes parallèles sont abordés. Il convient d'insister sur la complémentarité entre modulation et conversion d'énergie permettant de s'adapter aux caractéristiques de la charge. L'étude des convertisseurs d'énergie inclut les systèmes d'échanges thermiques. Les convertisseurs d'énergie sont traités en se limitant à leurs caractéristiques d'entrées/sorties externes. Le moteur thermique n'est étudié que dans le cas d'une hybridation.</i>
Adaptateurs d'énergie : réducteurs mécaniques, transformateurs électriques parfaits et échangeurs thermiques		1ère/T	2	
Actionneurs et modulateurs : moteurs électriques et modulateurs, vérins pneumatiques et interfaces, vannes pilotées dans l'habitat pour des applications hydrauliques et thermiques		1ère/T	3	
Accouplements permanents ou non, freins		1ère/T	2	
Convertisseurs d'énergie : ventilateurs, pompes, compresseurs, moteur thermique		1ère/T	2	
Éclairage		1ère/T	2	

Matrice des Centres d'intérêt

Niveaux d'analyse	Fonctionnel	Structurel	Comportemental
Matière	Caractéristiques des matériaux et des structures	Caractérisation des matériaux et des structures	Dimensionnement et choix des matériaux et structures
Matière et Énergie		Efficacité énergétique dans la relation ME	Optimisation des choix ME d'un système par simulation
Énergie	Formes caractéristiques et de l'Énergie	Caractérisation des chaînes d'énergie, rendement	Amélioration de l'efficacité énergétique à partir de simulations
Énergies et Information		Efficacité énergétique dans la relation EI	Optimisation des choix EI par simulation temporelle d'un système
Information	Formes caractéristiques et de l'information	Caractérisation des chaînes d'info, réseaux	Validation d'une commande et de son support par simulation
Information et Matériaux		Relation info/matériau: captage de l'info	Optimisation des choix IM par simulation fréquentielle d'un système

DOCUMENT RESSOURCE : PROGRAMME DES ENSEIGNEMENTS TECHNOLOGIQUES SPECIALITÉ ÉNERGIES ET ENVIRONNEMENT

A - Objectifs et compétences de la spécialité-énergies et environnement

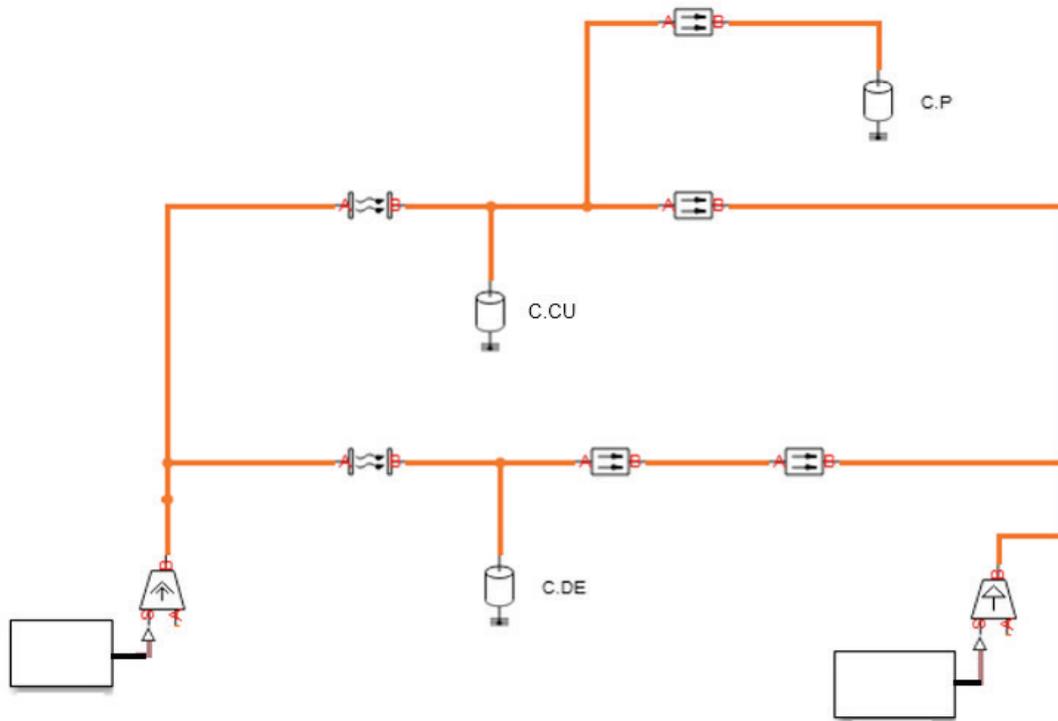
Objectifs de formation	Compétences attendues
O7 - Imaginer une solution, répondre à un besoin	<p>CO7.ee1. Participer à une démarche de conception dans le but de proposer plusieurs solutions possibles à un problème technique identifié en lien avec un enjeu énergétique</p> <p>CO7.ee2. Justifier une solution retenue en intégrant les conséquences des choix sur le triptyque matériau-énergie-information</p> <p>CO7.ee3. Définir la structure, la constitution d'un système en fonction des caractéristiques technico-économiques et environnementales attendues</p> <p>CO7.ee4. Définir les modifications de la structure, les choix de constituants et du type de système de gestion d'une chaîne d'énergie afin de répondre à une évolution d'un cahier des charges</p>
O8 - Valider des solutions techniques	<p>CO8.ee1. Renseigner un logiciel de simulation du comportement énergétique avec les caractéristiques du système et les paramètres externes pour un point de fonctionnement donné</p> <p>CO8.ee2. Interpréter les résultats d'une simulation afin de valider une solution ou l'optimiser</p> <p>CO8.ee3. Comparer et interpréter le résultat d'une simulation d'un comportement d'un système avec un comportement réel</p> <p>CO8.ee4. Mettre en œuvre un protocole d'essais et de mesures sur le prototype d'une chaîne d'énergie, interpréter les résultats</p>
O9 - Gérer la vie d'un système	<p>CO9.ee1. Expérimenter des procédés de stockage, de production, de transport, de transformation, d'énergie pour aider à la conception d'une chaîne d'énergie</p> <p>CO9.ee2. Réaliser et valider un prototype obtenu en réponse à tout ou partie du cahier des charges initial</p> <p>CO9.ee3. Intégrer un prototype dans un système à modifier pour valider son comportement et ses performances</p>

Centres d'intérêts Spécialité EE

Centres d'intérêt proposés	Outils et activités mis en œuvre	Connaissances abordées	Réf de compétences visées
CI 1 Typologie des systèmes énergétiques	Mise en œuvre un équipement didactique Modélisation des chaînes d'énergie Systèmes techniques intégrant une gestion d'énergie, de charge, d'énergies renouvelables. Systèmes mono source ou multi sources Équipements didactiques du laboratoire EE	Approche fonctionnelle d'une chaîne d'énergie Approche fonctionnelle du système de gestion de la chaîne d'énergie Décodage des procédures d'installation Mise en œuvre d'un système local de gestion de l'énergie	CO7.EE3 CO8.EE4
CI 2 Production d'énergie	Caractérisation d'un système de production d'énergie Systèmes de production d'électricité, de chaleur et de froid Dispositif d'acquisition de données multi physiques. Études réalisées sur des dossiers réels avec possibilité de faire des visites sur site ou conférence	Types et caractéristiques des centrales électriques, hydrauliques, thermiques Types de solutions de production d'énergies renouvelables, caractéristiques Sûreté de fonctionnement et prévention des risques	CO7.EE3 CO8 CO9.EE1
CI3 Transport, stockage et distribution de l'énergie et réseaux spécifiques	Caractérisation de la structure d'un réseau de transport et de distribution d'énergie et simulations associées. Le stockage d'énergie et solutions associées Études réalisées sur des dossiers réels avec possibilité de faire une visite sur site ou conférence	Comportement énergétique des systèmes et validation comportementale par simulation Structure d'un réseau de transport et de distribution d'électricité Structure d'un réseau de transport et de distribution de fluides Comptage et facturation de l'énergie. Impact environnemental Sûreté de fonctionnement et prévention des risques	CO7.EE3 CO8 CO9.EE1
CI 4 Efficacité énergétique passive	Efficacité et rendement d'une chaîne d'énergie Comportement des constituants (modulateurs, convertisseurs, transmetteurs) Solutions passives d'amélioration de l'efficacité énergétique Équipements didactiques pour comparaisons, modifications. Logiciels de simulation (dans le cadre de l'habitat par exemple)	Projet technologique Approche fonctionnelle d'une chaîne d'énergie Sûreté de fonctionnement et prévention des risques Essais et réglages en vue d'assurer le fonctionnement et d'améliorer les performances	CO7 CO8 CO9.EE2 CO9.EE3
CI 5 Efficacité énergétique active	Caractérisation du mode de gestion de l'énergie d'un système Paramétrage de l'unité de gestion Évaluation d'une solution active d'amélioration de l'efficacité énergétique. Équipements didactiques intégrant une solution de gestion par l'apport d'un interface de la chaîne d'information paramétrable ou programmable et intégrée à la chaîne d'énergie (automate, régulation, télégestion, télésurveillance, etc.)	Projet technologique Approche fonctionnelle du système de gestion de la chaîne d'énergie Sûreté de fonctionnement et prévention des risques Essais et réglages en vue d'assurer le fonctionnement et d'améliorer les performances	CO7 CO8 CO9.EE2 CO9.EE3

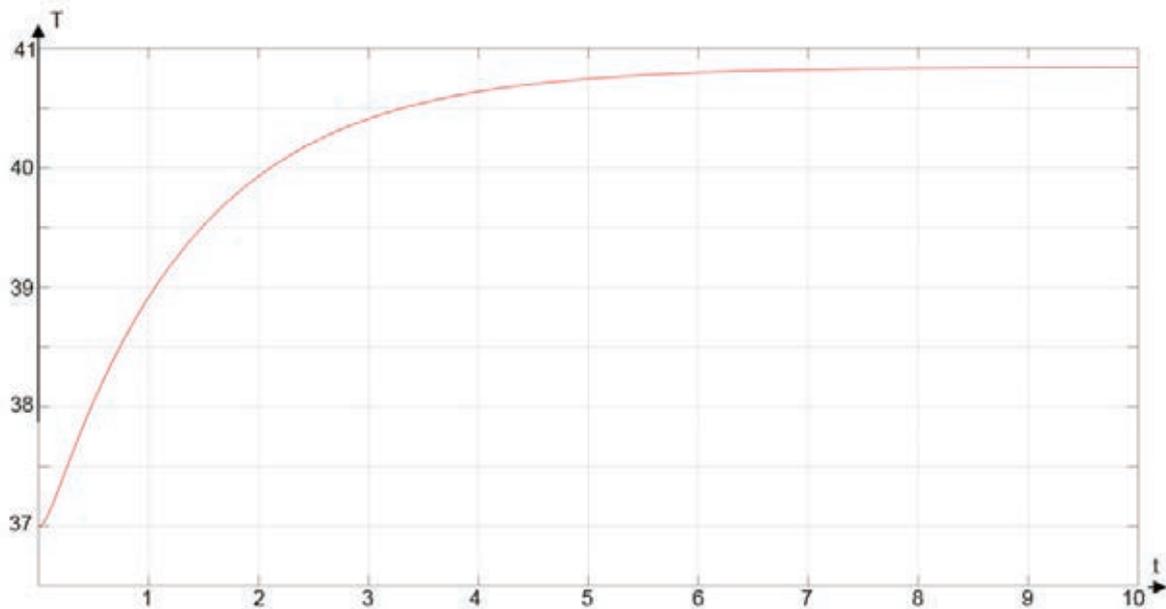
Document extrait : *Ministère de l'éducation nationale (DGESCO) Enseignement spécifique – Terminale STI2D*
www.eduscol.education.fr/

DOCUMENT RÉPONSE DR1: MODÉLISATION ACAUSALE



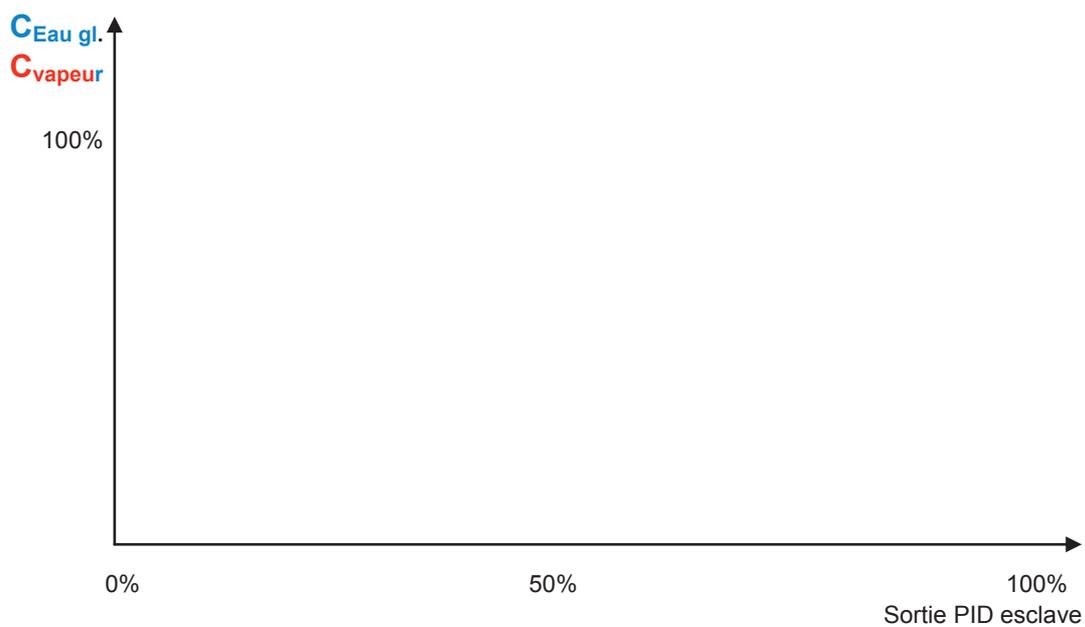
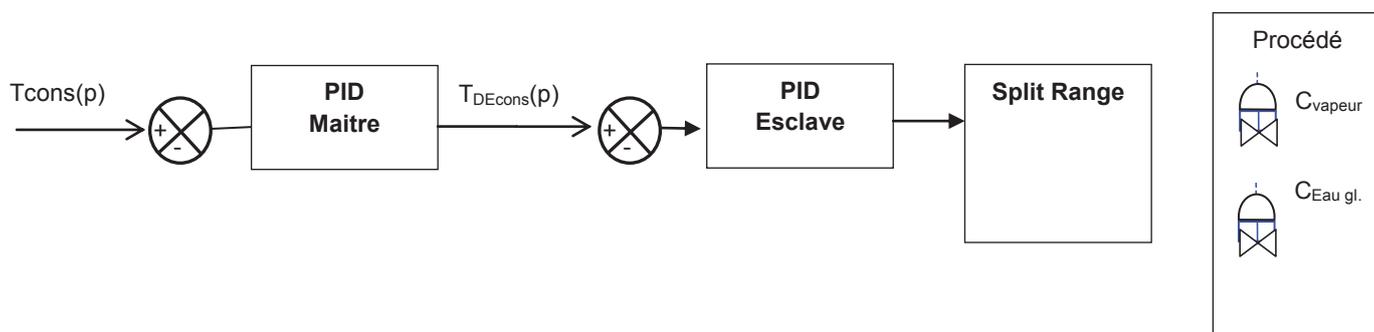
DOCUMENT RÉPONSE DR2: IDENTIFICATION FONCTION DE TRANSFERT

Température T en $^{\circ}\text{C}$ fonction du temps 1 graduation = 10000s



**DOCUMENT RÉPONSE DR3:
SCHÉMA BLOC DEUXIÈME STRATÉGIE,
RÉGULATION CASCADE**

DOCUMENT RÉPONSE DR4: SCHÉMA BLOC TROISIÈME STRATÉGIE, RÉGULATION SPLIT RANGE



DOCUMENT RÉPONSE DR5: INCERTUDE DE MESURE

Seulement les cases grisées sont à remplir.

CAPTEUR DE TEMPERATURE

Sondes	Tolérance maximale (formule)	Tolérance à 100°	Plage contenant 95% des mesures (100°)	Tolérance à 37°	Ecart type σ à 37°C
Pt 100 F0.15 (Classe A)					
Pt100 F0.1 (1/3 classe B)					
Pt 100 F0.3 (Classe B)					

INCERTITUDE CHAINE DE MESURES

Elément	Echelle min	Echelle max	Grandeur d'influence	Formule constructeur de l'erreur ou valeur	Type d'incertitude correspondante	Coefficient de conversion	Ecart type σ
Pt100 F0.1 (1/3 classe B)	0°	150°C	Température		Type A 2 σ	2	
Transmetteur	0	150°C	Mesure	0,1°C ou 0,08% échelle	Type A 3 σ		
CAN	4mA	20mA	Quantification	Résolution :	Type B		
			Température 25°	0,142% de PE	Type B		
					somme quadratique		
					ICM élargie	2	