



Exercices de la séquence 3

Système de régulation

EXERCICE 1 : Vocabulaire

Compléter le texte avec la liste de mots suivants :

Grandeur réglée, consigne, grandeurs perturbatrices.

Dans un dispositif technique, le procédé de régulation a pour rôle d'amener une grandeur physique (**grandeur réglée**) à prendre une valeur fixée à l'avance (la consigne) et de l'y maintenir quelles que soient les **grandeurs perturbatrices** subies par le système.

EXERCICE 2 : Régulation de température d'un processeur

La température est une grandeur ayant une grande influence sur le comportement d'un ordinateur. Par exemple, la température maximale préconisée pour un processeur est inférieure à 90°C.

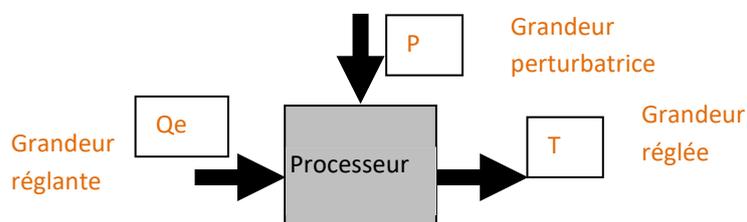
La puissance thermique dégagée par le processeur est due à l'activité du processeur en lien avec les applications ou programmes exécutés. En effet une partie de la puissance électrique absorbée par le processeur est dissipée par effet Joule.

Un dissipateur thermique associé à un ventilateur permet d'évacuer l'énergie thermique vers l'extérieur afin de baisser sa température.

La vitesse du ventilateur peut être modifier en fonction de de la quantité d'énergie à évacuer.

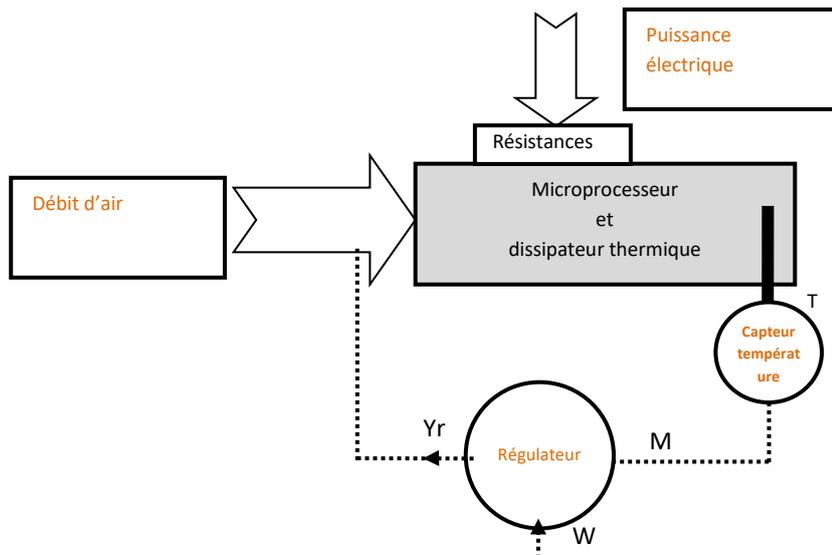
1. Compléter les pointillés du schéma ci-dessous avec les 6 grandeurs du tableau

• Température	T	• Grandeur réglante
• Débit d'air	Qe	• Grandeur perturbatrice
• Puissance électrique	P	• Grandeur réglée



T dépend de Qe et P

2. Compléter les pointillés du schéma ci-dessous en indiquant dans les rectangles, les grandeurs physiques mises en jeu et le nom des appareils dans les cercles.



3. Compléter le texte ci-dessous avec les verbes suivants : AGIR, MESURER, COMPARER

Les éléments de la boucle de régulation doivent permettre de :

- **Mesurer** la température T (**MESURE M**)
- **Comparer** M à la **CONSIGNE (W)**
- **Agir** sur le ventilateur en élaborant un signal de **COMMANDE (Yr)**

EXERCICE 3 : Champagne avec modération

Lors de la fermentation alcoolique du jus de raisin pour le transformer en champagne, un dégagement de CO₂ se produit. La quantité de CO₂ se trouvant alors dans l'air de la cave peut être dangereuse pour le viticulteur qui y travaille. Les viticulteurs décident de mettre en place un système de ventilation pour réguler le taux de CO₂ dans la cave. Ce système a pour effet d'amener dans la cave, grâce à un ventilateur, de l'air sans CO₂

DOCUMENT1 : Les dangers du taux de CO₂ dans l'air

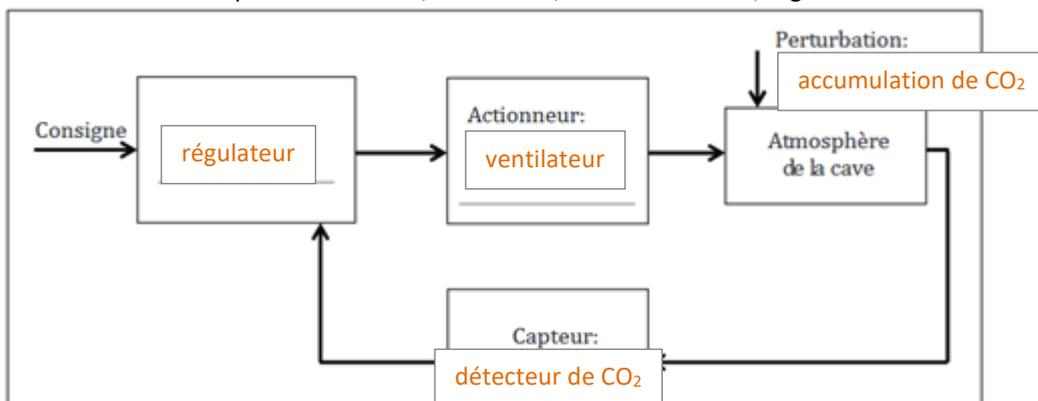
Le taux usuel du dioxyde de carbone dans l'air est de 0,03 % (300 ppm).

En dessous de 0,1 % de CO₂, on peut considérer que l'air n'est pas dangereux.

A partir d'un taux de 1 %, on peut commencer à ressentir un manque de tonus et une certaine fatigue.

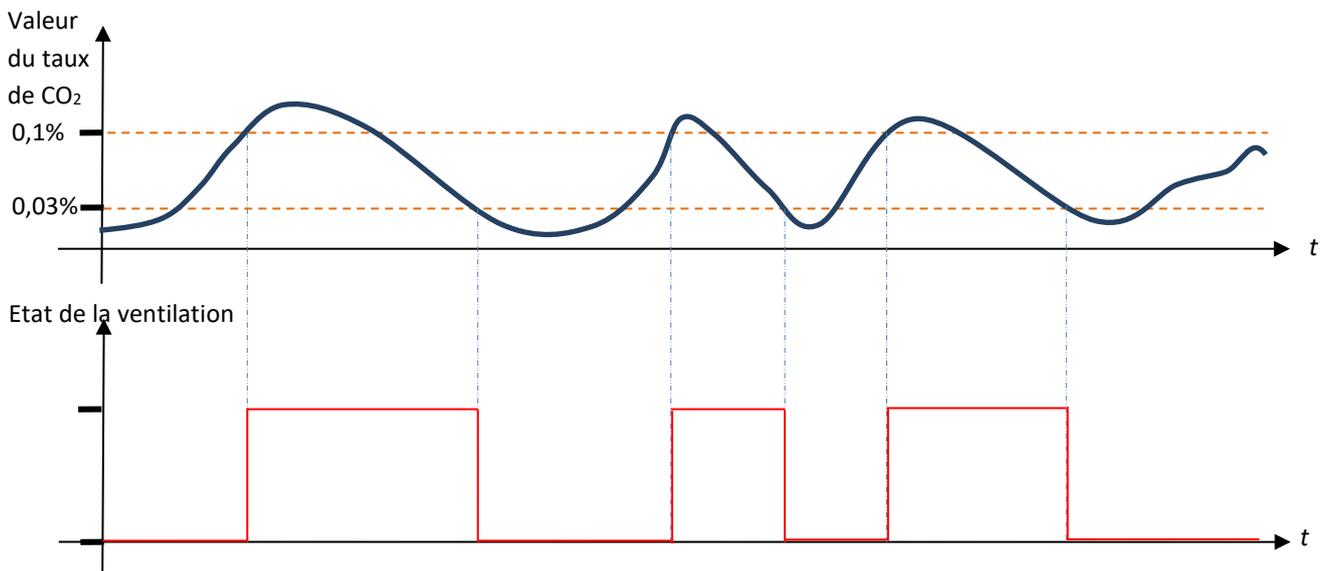
Au-delà de 5 %, l'exposition au CO₂ provoque un halètement violent, l'épuisement et de graves maux de tête ; en cas d'exposition prolongée, les lésions peuvent être irréversibles.

1. Compléter le schéma fonctionnel de la boucle de régulation ci-dessous avec les éléments suivants : accumulation de CO₂ par fermentation, ventilateur, détecteur de CO₂, régulateur.





- Préciser quelle est la grandeur réglante, la grandeur réglée et la grandeur perturbatrice.
Grandeur réglante : débit d'air
Grandeur réglée : taux de CO₂
Grandeur perturbatrice : accumulation de CO₂ par fermentation
- Le technicien qui doit mettre en place le système de régulation propose une régulation à action discontinue (TOR) à deux seuils de basculement. Donner les deux états possibles de l'actionneur lors de ce type de régulation.
Le ventilateur fonctionne ou ne fonctionne pas.
- En vous servant du **document 1**, déterminer les deux seuils de basculement à régler sur le régulateur pour que l'air dans la cave ne soit pas dangereux.
Seuil haut : 0,1% de CO₂ ; seuil bas : 0,03% de CO₂.
- Justifier pourquoi le technicien a privilégié le choix d'une régulation TOR à deux seuils de basculement plutôt qu'une régulation TOR à un seuil de basculement.
Le ventilateur n'est pas toujours en train de se mettre en marche ou de s'arrêter
- Tracer qualitativement l'évolution de l'état de fonctionnement de la ventilation si la ventilation est régulée comme indiqué précédemment. (ne pas oublier d'indiquer ces états sur l'axe vertical)

Document 1 : régulation du taux de CO₂ dans l'air



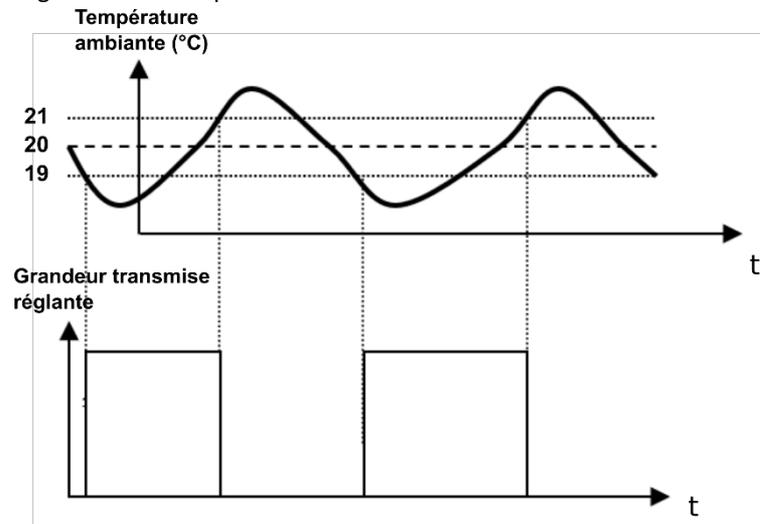
EXERCICE 4 : Régulation de température TOR

M. Dupont souhaite réduire sa facture de chauffage. Pour cela, il prend conseil auprès d'une société spécialisée qui lui a présenté le fonctionnement d'une régulation thermique en Tout ou Rien.

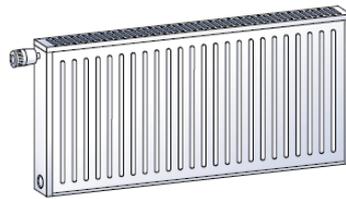
Dans l'exemple ci-contre, la valeur centrale de la consigne de température est fixée à 20°C, assortie d'une hystérésis (variation autour du point de consigne de 1°C). Le chauffage est donc allumé à 19°C et arrêté à 21°C.

Ce mode de régulation a l'avantage d'être simple mais le défaut est de faire constamment fluctuer la température ambiante.

L'organe de commande est une vanne de réglage motorisée qui pilote la circulation d'eau chaude dans les radiateurs.

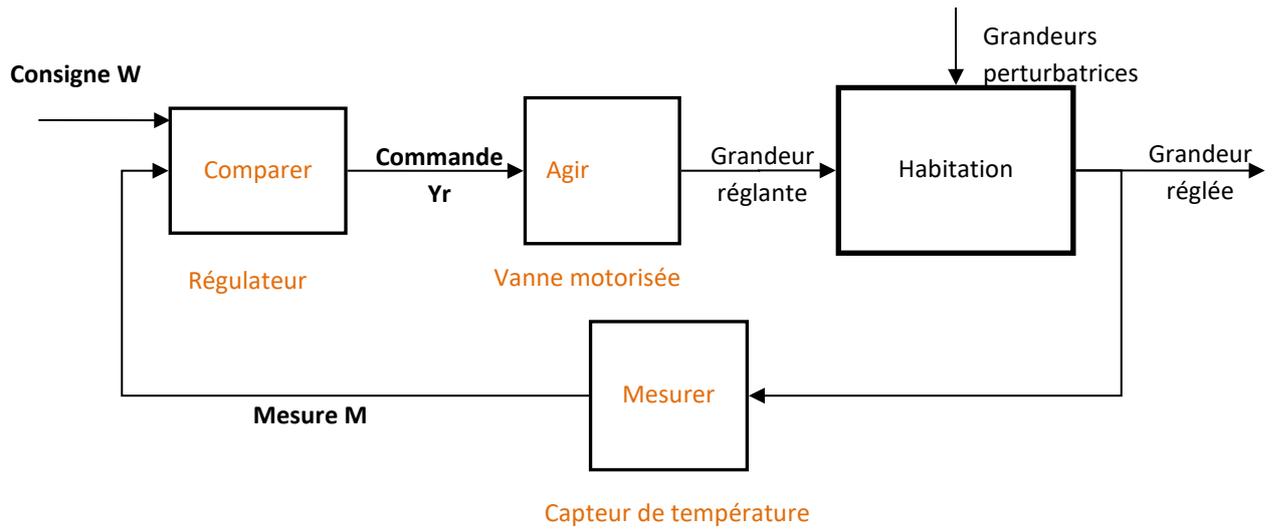


Document 1 : régulation thermique TOR



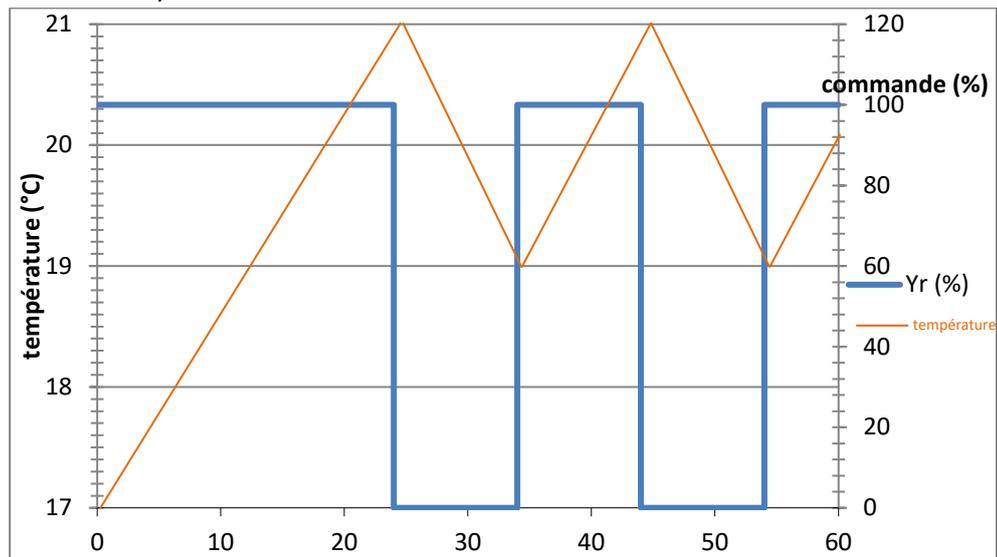
Document 2 : organe de chauffage

1. Dans l'exemple proposé par la société, s'agit-il d'une régulation à un seuil ou deux seuils ? Justifier.
Il s'agit d'une régulation deux seuils puisque le chauffage se met en route en dessous d'un seuil bas (19°C) et s'arrête au-dessus d'un seuil haut (21°C).
2. Dans ce système de régulation dont le schéma est donné dans le Document 3, préciser quelle est la grandeur réglée, la grandeur réglante.
Grandeur réglée : température ; grandeur réglante : débit d'eau chaude.
3. Citer au moins deux grandeurs perturbatrices.
Les échanges thermiques avec le milieu extérieur et le débit d'air du système d'extraction d'air de la maison (l'air intérieur est rejeté et il est remplacé par un air neuf venant de l'extérieur).
4. Compléter le schéma du Document 3 ci-dessus en rajoutant le nom des instruments en dessous des rectangles vides et à l'intérieur des rectangles, les actions à réaliser dans la boucle de régulation.



Document 3 : schéma de la boucle fonctionnelle

5. La consigne est fixée à 19°C avec un seuil bas à 18°C et un seuil haut à 20°C. Tracer sur le document 4 ci-dessus l'évolution théorique de la température dans la pièce au cours du temps sachant qu'initialement il y faisait 17°C.



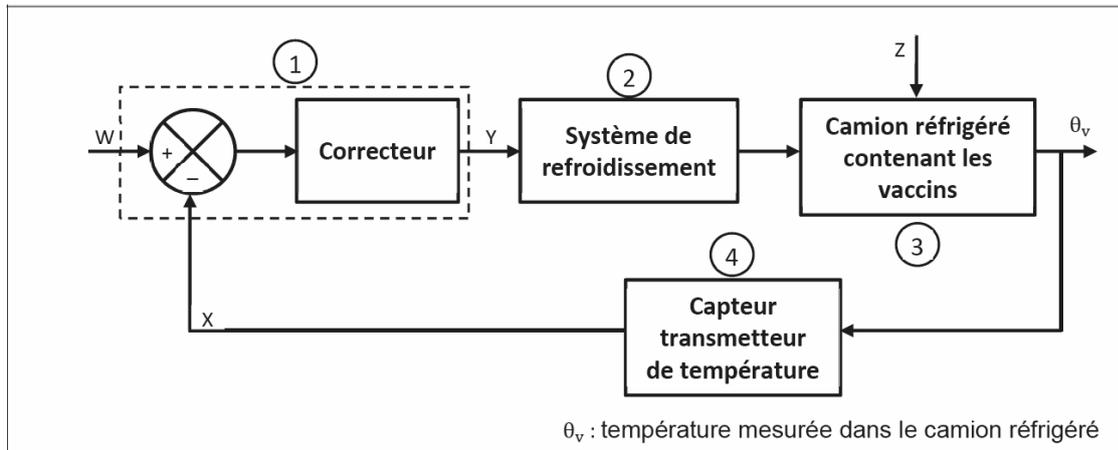
Document 4 : signal de commande du chauffage



EXERCICE 5 : Conservation d'un vaccin pendant son transport (d'après BAC septembre 2022)

Certains vaccins sont des produits thermosensibles qui nécessitent des précautions de stockage. Ainsi pour conserver ces vaccins sur le long terme durant le transport et dans les centres de distribution, la température doit être maintenue entre -25 °C et -15 °C . Durant le transport dans les camions, un cahier des charges impose une valeur de consigne égale à -20 °C et avec des variations inférieures à $0,5\text{ °C}$. Une boucle de régulation de température à action continue est alors mise en place et est schématisée sur le document 1

Etude de la boucle de régulation



Document 1 : Schéma fonctionnel de la boucle de régulation de la température de conservation d'un vaccin

1. Donner le principal avantage de l'utilisation de la régulation à action continue par rapport à une régulation à action discontinue (Tout Ou Rien, T.O.R.).
Une régulation à action continue permet d'éviter les démarrages ou arrêts intempestifs de l'organe de commande. L'autre intérêt est d'obtenir une température régulée au plus proche de la consigne. Dans le cas d'une régulation discontinue, la température oscille autour de la consigne sans jamais se stabiliser.
2. Nommer la fonction de chaque élément constitutif de la boucle de régulation (1 à 4).
(1) : comparer la mesure à la consigne
(2) : agir sur le système pour le refroidir
(3) : maintenir les vaccins à température constante
(4) : mesurer la température
3. Préciser pour chaque grandeur X, Y, W et Z s'il s'agit du signal de commande, de la mesure, de la consigne ou des perturbations.
X : mesure
Y : Signal de commande
W : consigne
Z : perturbations
4. Donner la valeur de consigne, le nom de la grandeur réglée et citer un phénomène perturbateur pour ce dispositif de transport réfrigérant des vaccins.
Consigne : -20 °C
Grandeur réglée : température dans le camion réfrigéré
Perturbations : ouverture de la porte, échanges thermiques avec l'extérieur (convection, rayonnement...)



EXERCICE 6 : Régulation proportionnelle

On étudie une régulation de température proportionnelle dans laquelle on commande la puissance thermique injectée dans un procédé

L'algorithme de régulation P est défini par : $Y_r = K(W - M)$. On fixe la consigne à 40°C

(Y_r en %, M et W en °C, K en °C⁻¹)

1. Quels sont les avantages et les inconvénients de la régulation proportionnelle ?

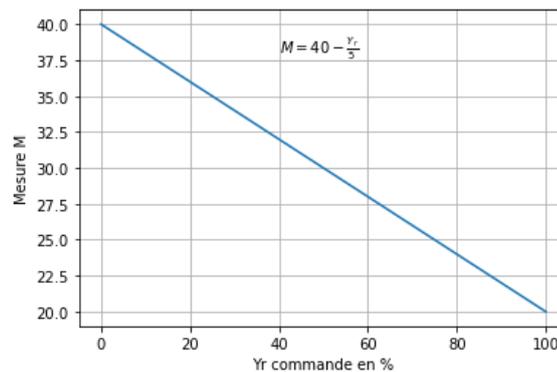
Une régulation proportionnelle permet d'éviter les démarrages ou arrêts intempestifs de l'organe de commande. La température s'approche de la consigne sans osciller. L'inconvénient est qu'il existe un écart statique entre la température atteinte et la consigne.

2. Le régulateur est réglé avec $K = 5$. Pour M variant de 0 à 100°C, tracer sur votre feuille, la courbe représentant M en fonction de Y_r pour le régulateur.

D'après l'algorithme P de régulation on peut écrire l'équation :

$$M = W - \frac{Y_r}{K}$$

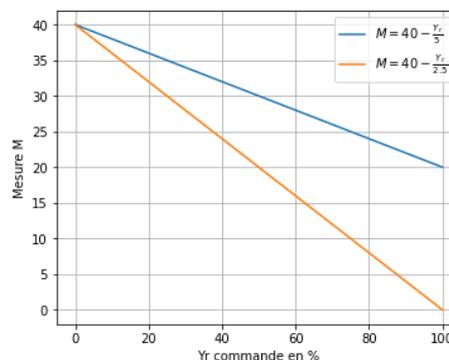
$$M = 40 - \frac{Y_r}{5}$$



3. On donne ci-dessous, la caractéristique statique du procédé pour une valeur de perturbation. Superposer la courbe du régulateur avec $K = 5$ et la caractéristique statique. Définir l'erreur de statisme et la déterminer pour $K = 5$.

L'écart statique ES1 est environ égal à 17°C.

4. Le régulateur est réglé maintenant avec $K = 2.5$. Pour M variant de 0 à 100°C, tracer sur votre feuille, tracer la courbe représentant M en fonction de Y_r pour le régulateur



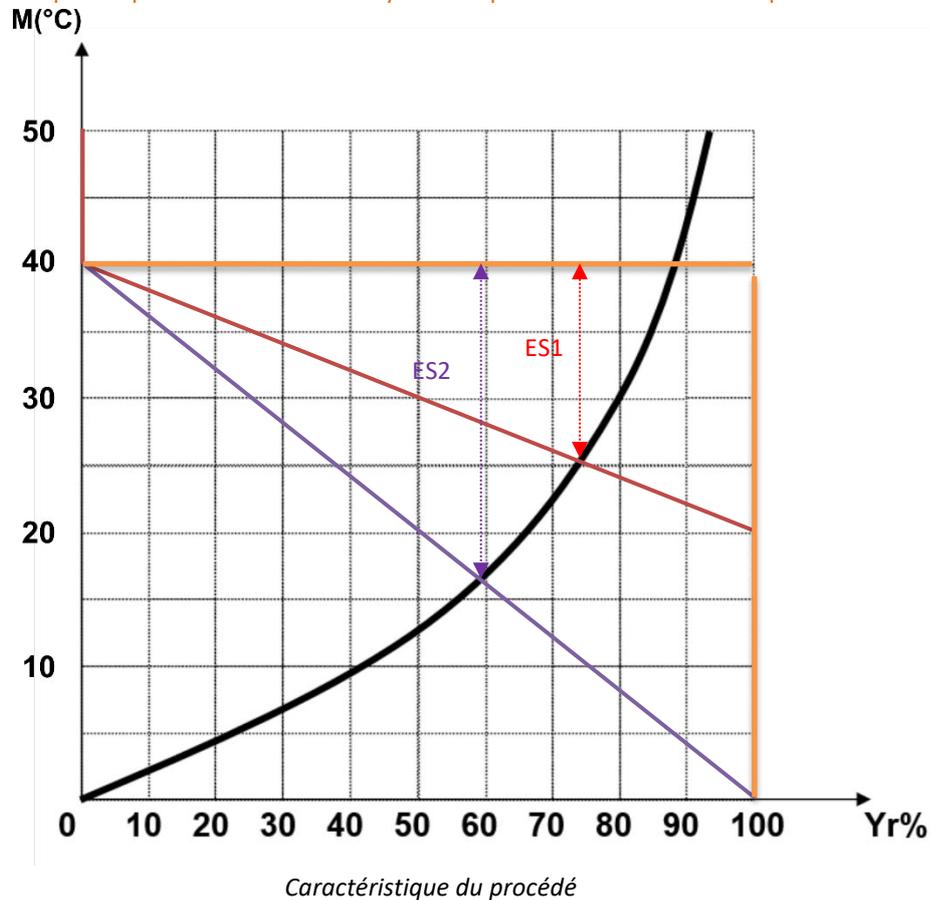
5.

6. Superposer la courbe du régulateur avec $K = 2.5$ et la caractéristique statique. Déterminer l'erreur statique pour $K = 2.5$.

L'écart statique ES2 est environ égal à 23°C.



7. Conclure sur l'influence de la valeur de K sur l'erreur statique
Lorsque K diminue, le point de fonctionnement « descend » le long de la caractéristique statique et donc l'écart statique augmente. Autrement dit plus K augmente plus l'écart statique se réduit.
8. On fixe $K = 50$. Tracer la courbe du régulateur puis superposer la à la caractéristique statique du procédé.
9. Quelle est la valeur de l'écart statique. Commenter le choix de cette valeur de K .
L'écart statique est proche de zéro. Mais il y a un risque d'oscillation de la température.

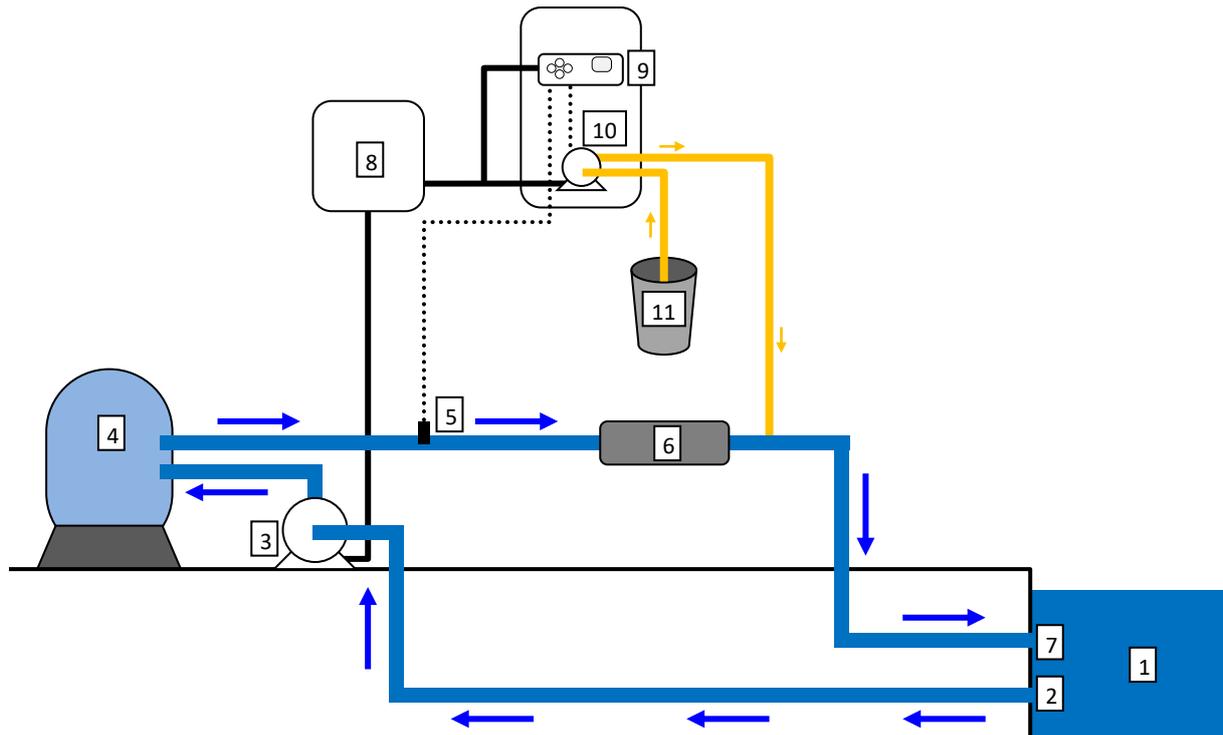


EXERCICE 7 : Traitement automatisé de l'eau d'une piscine municipale

Le pH indique l'acidité de l'eau. Pour le confort des baigneurs le pH de la piscine doit être maintenu entre 7,2 et 7,4. En dessous l'eau est agressive. Au-dessus, des doses plus importantes de désinfectant sont nécessaires pour maintenir une eau saine et lutter contre le développement des algues.

La qualité minéralogique de l'eau, la température, les apports d'eau, le nombre de baigneurs, la durée de filtration, ... font que le pH de l'eau de la piscine varie continuellement et naturellement. Il se modifie d'heures en heures, il peut même passer d'un taux de 7 à celui de 8 en une seule journée !

La correction manuelle du pH de l'eau de la piscine est contraignante et délicate car les quantités de produit correcteur ajoutées en une seule fois pour s'approcher de la valeur idéale sont souvent trop importantes. La régulation automatique corrige le pH par micro injection dès qu'elle analyse un changement.

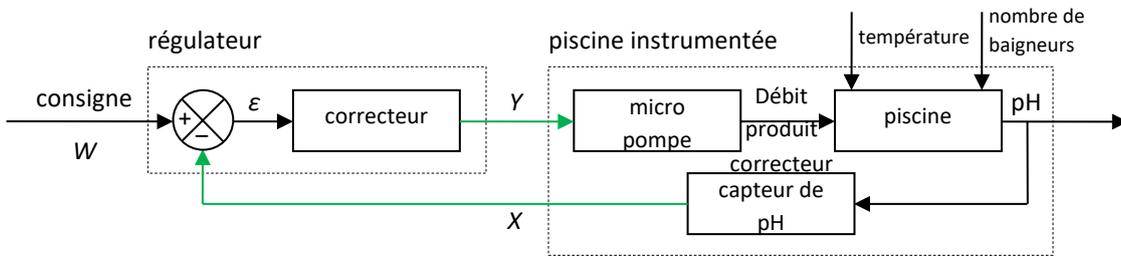


Document 1 : Schéma de principe du système de régulation de pH de la piscine

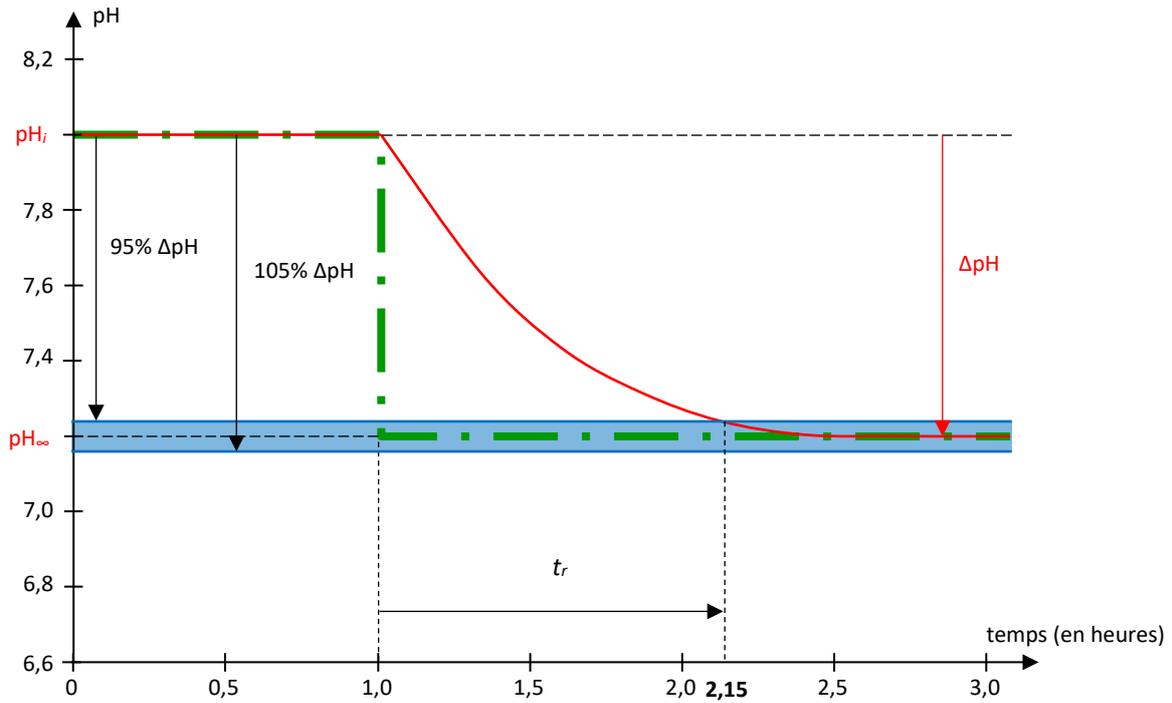
- 1) piscine (bassin de nage)
- 2) trou d'aspiration
- 3) pompe de filtration
- 4) filtre
- 5) sonde pH
- 6) chauffage
- 7) trou de refoulement
- 8) coffret d'alimentation électrique
- 9) boîtier électronique
- 10) micro pompe
- 11) réservoir de produit correcteur pH



1. Quelle est la grandeur réglée ? Quelle est la grandeur réglante ? Citer deux grandeurs perturbatrices ?
 La grandeur maîtrisée/réglée (celle qui doit être maintenue fixe) est le **pH**.
 La grandeur réglante (celle qui permet de contrôler le pH) est le **débit de produit correcteur de pH de la micro pompe**.
 Quelques grandeurs perturbatrices (celles qui ont tendance à modifier le pH mais qui ne sont pas contrôlées par le système de régulation) : **la température, le nombre de baigneurs, la durée de filtration ...**
2. Repérer l'élément du document 1 correspondant à l'actionneur ?
 Sur le document 1, le **numéro 10 (la micro pompe)** correspond à l'actionneur.
3. Établir le schéma fonctionnel de la boucle de régulation.



4. Sur le document 1, de quelle façon les signaux d'interconnexion des éléments constitutifs des chaînes d'action et de retour (signal de commande et signal du capteur) sont-ils représentés ?
 Sur le document 1, les signaux d'interconnexion des éléments constitutifs des chaînes d'action et de retour (signal de commande et signal du capteur) sont représentés par des **lignes en pointillés**.
5. On réalise deux études de la réponse du système à un échelon de consigne (documents 2 et 3). Combien vaut cet échelon de consigne ?
 L'échelon de consigne est $\Delta W = W_\infty - W_0 = 7,2 - 8,0 = -0,8$ unité pH
6. Déterminer l'écart statique pour les deux situations des documents 2 et 3.
 L'écart statique ϵ_s est nul car le pH final est égal à la consigne W : $\epsilon_s = W_\infty - \text{pH}_\infty = 0$
7. Les deux situations étudiées caractérisent-elles plutôt une régulation proportionnelle seule ou plutôt une régulation proportionnelle et intégrale ? Justifier la réponse.
 Vu que l'écart statique est nul, il ne s'agit pas simplement d'une régulation proportionnelle mais cette régulation a aussi une composante intégrale.
8. Déterminer le temps de réponse à 5 % dans le cas d'une régulation avec un gain proportionnel de 0,05.



Document 2 : Réponse du système à un échelon de consigne
cas d'une régulation avec un gain proportionnel de 0,05

variation de pH : $\Delta pH = pH_{\infty} - pH_i = 7,2 - 8,0 = -0,8$ unité pH

95 % de la variation de pH = $\frac{95}{100} \times \Delta pH = \frac{95}{100} \times (-0,8) = -0,76$ unité pH

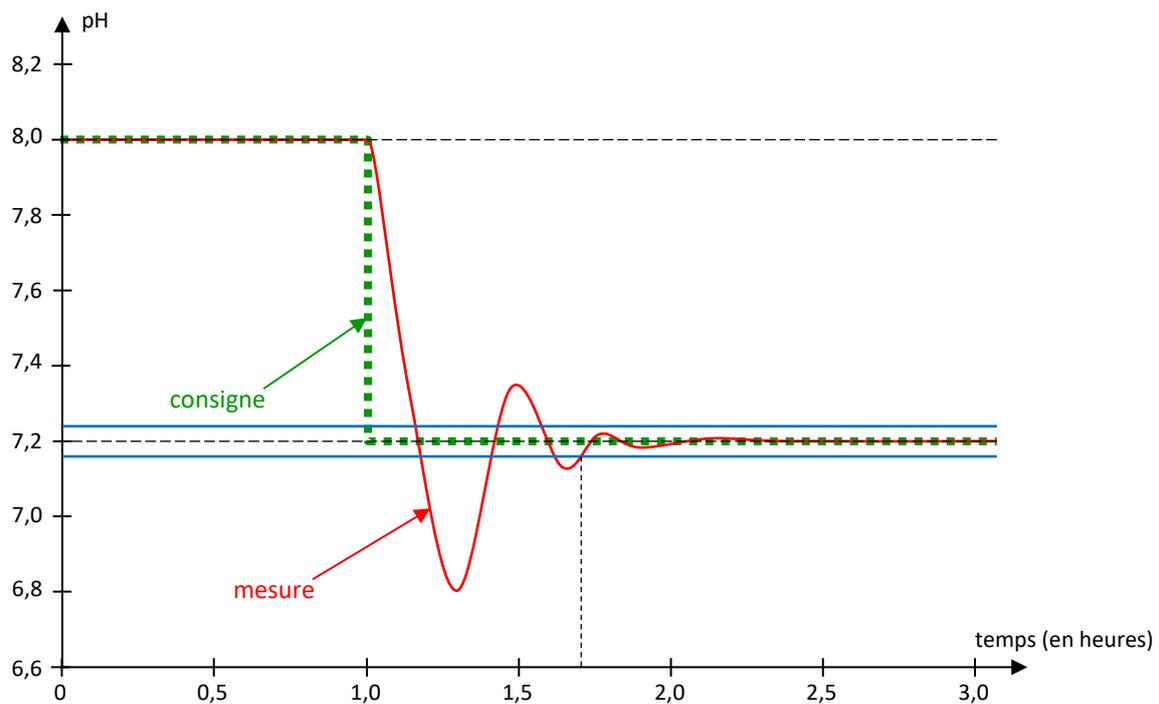
$pH_i - 95\%$ de la variation de pH = $8,0 - 0,76 = 7,24$ unité pH

105 % de la variation de pH = $\frac{105}{100} \times \Delta pH = \frac{105}{100} \times (-0,8) = -0,84$ unité pH

$pH_i - 105\%$ de la variation de pH = $8,0 - 0,84 = 7,16$ unité pH

$t_r = (2,1 \text{ ou } 2,2) - 1,0 = 1,1 \text{ ou } 1,2 \text{ h}$

9. Déterminer le temps de réponse à 5 % dans le cas d'une régulation avec un gain proportionnel de 0,6.



Document 3 : Réponse du système à un échelon de consigne
cas d'une régulation avec un gain proportionnel de 0,6

On travaille avec les mêmes valeurs... sauf pour t_r :

$$t_r = 1,7 - 1,0 = 0,7 \text{ h}$$

10. Quel est, parmi les réglages étudiés, celui qui permet d'avoir le système le plus rapide ?

Parmi les réglages étudiés, celui qui permet d'avoir le système le plus rapide est le 2nd (gain proportionnel de 0,6) car le temps de réponse à 5 % est plus petit.

11. Quel est le principal défaut du cas d'une régulation avec un gain proportionnel de 0,6 ?

Le principal défaut du cas d'une régulation PI avec un gain proportionnel de 0,6 est que le premier dépassement est important (-0,4 unité pH) avec un pH descendant jusqu'à 6,8 ... ce qui fait que l'eau est "agressive" (pH < 7,2).



EXERCICE 8 : Chauffage aérothermique

Un système de chauffage aérothermique est constitué d'une pompe à chaleur air/eau (PAC) et d'un circuit hydraulique (Figure 1).

On ne s'intéressera qu'à la partie hydraulique du système constitué d'un ballon tampon, d'un plancher chauffant, d'une pompe (appelé circulateur) et d'une vanne mélangeuse 3 voies.

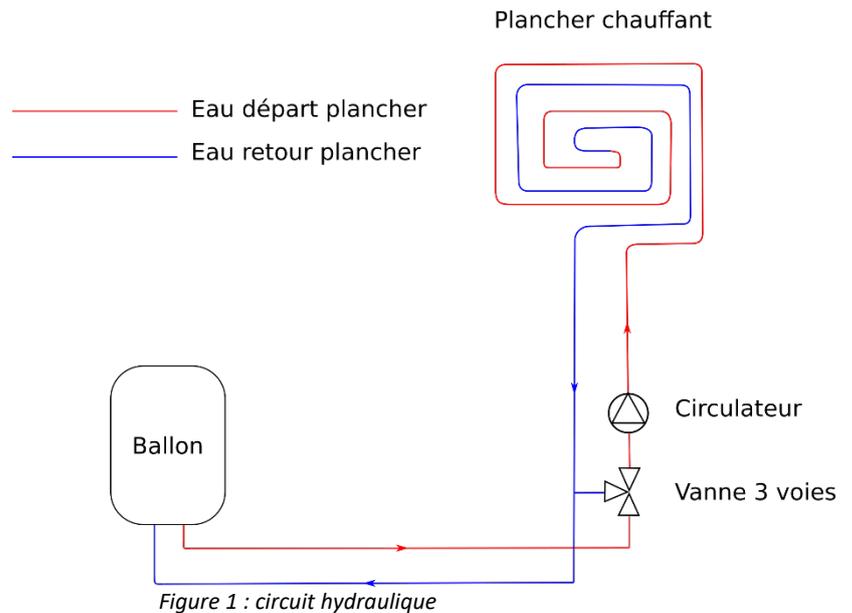


Figure 1 : circuit hydraulique

On souhaite maintenir la maison à une température de consigne $T_{\text{consigne}} = 19^{\circ}\text{C}$.

La puissance thermique libérée par le plancher chauffant, permet de compenser les déperditions thermiques de la maison.

Partie 1 : régulation de la température de départ plancher chauffant

La température de l'eau, envoyée dans le plancher chauffant, est réglée à l'aide d'une vanne mélangeuse 3 voies selon le dispositif de la figure 1. Cette vanne mélange l'eau de retour du plancher et l'eau provenant du ballon pour que la température de départ du plancher chauffant (notée T_{PC}) soit optimale. La température T_{PC} est mesurée à la sortie de la vanne 3 voies.

Cette température est variée en fonction de de la température de consigne de la maison, de la température extérieure et des caractéristiques thermiques de la maison. Dans le cas particulier de la maison étudiée, la température de départ plancher chauffant est donnée par la relation :

$$T_{\text{PC}} = 0,5 (T_{\text{consigne}} - T_{\text{ext}}) + 19$$

1. Quelle est la température de départ du plancher chauffant lorsque la température extérieure vaut 2°C , 10°C ? Comment varie cette température lorsque la température extérieure diminue ?

$T_{\text{PC}} = 27,5^{\circ}\text{C}$ pour $T_{\text{ext}} = 2^{\circ}\text{C}$ et $T_{\text{PC}} = 23,5^{\circ}\text{C}$ pour $T_{\text{ext}} = 10^{\circ}\text{C}$. La température de départ plancher augmente lorsque la température extérieure diminue.

2. Pour le système de régulation de température du départ de plancher chauffant, quelles sont la grandeur réglée, la grandeur réglante et les grandeurs perturbatrices ?

La grandeur réglée est la température du départ de plancher chauffant.

La grandeur réglante est le débit d'eau « froide » injectée dans le circuit d'eau chaude du plancher chauffant.

Les grandeurs perturbatrices sont les conditions climatiques qui varient au gré de la météo, le fait que les portes soient ouvertes ou fermées, que la maison bénéficie d'un apport de chaleur extérieur (soleil, poêle)...

Partie 2 : régulation de la température d'eau du ballon tampon

La température du ballon est aussi réglée. On utilise pour cela un régulateur à deux seuils. La température du ballon doit être comprise entre 35°C et 50°C . C'est l'échangeur de la PAC qui chauffe l'eau du ballon. Si la température est inférieure à 35°C , la PAC se met en marche. Lorsque la température est supérieure à 50°C , la PAC s'arrête.

On note P_{PC} la puissance libérée par le plancher chauffant à l'intérieur de la maison. En supposant que la PAC est arrêtée, la puissance thermique cédée par l'eau chaude du ballon correspond à celle libérée par le plancher (en supposant les pertes thermiques du ballon négligeables).



Lorsque la PAC est à l'arrêt et que l'eau chaude circule dans le plancher chauffant, la température dans le ballon diminue donc.

La diminution de température de l'eau du ballon en une minute est $\frac{\Delta T}{\Delta t} = -0,5^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$.

Lorsque la PAC se remet en marche, la puissance effectivement absorbée par l'eau permet de la réchauffer avec une variation de température par minute qui vaut $\frac{\Delta T}{\Delta t} = 2^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$.

3. Quelles sont les températures pour lesquelles la PAC se met en marche et s'arrête ?

La PAC se met en route lorsque la température descend en dessous de 35°C et s'arrête lorsque la température dépasse 50°C .

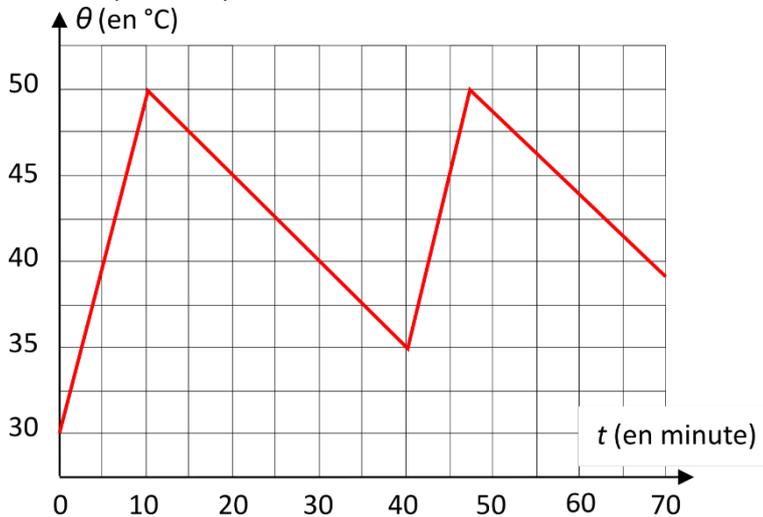
4. Pour le système de régulation de température du ballon, quelles sont les grandeurs réglée, réglante, perturbatrices ?

La grandeur réglée est la température du ballon.

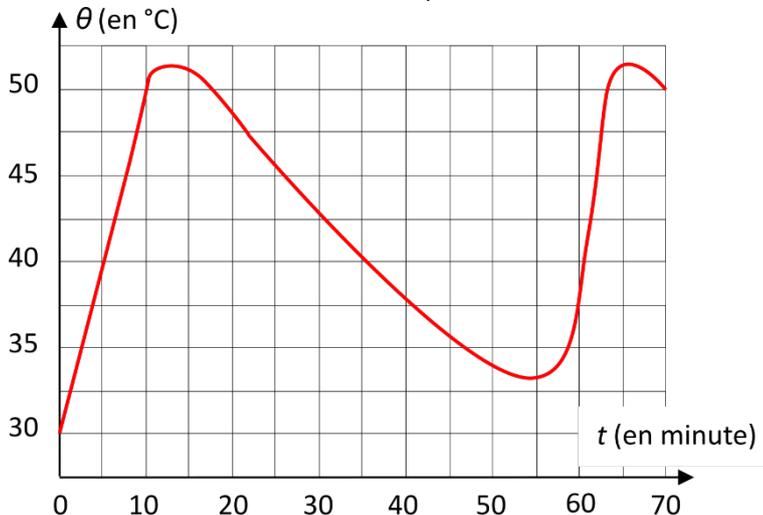
La grandeur réglante est la puissance thermique apportée par l'échangeur de la PAC.

Les grandeurs perturbatrices sont la température de retour de l'eau du plancher chauffant mais aussi les déperditions thermiques du ballon (faibles).

5. Représenter l'évolution temporelle de la température du ballon pour les 35 premières minutes, en supposant que la température initiale vaut 30°C .



6. L'évolution des températures réellement constatée ressemble plutôt à la courbe du graphique ci-après. Justifier la différence avec l'évolution prédite.

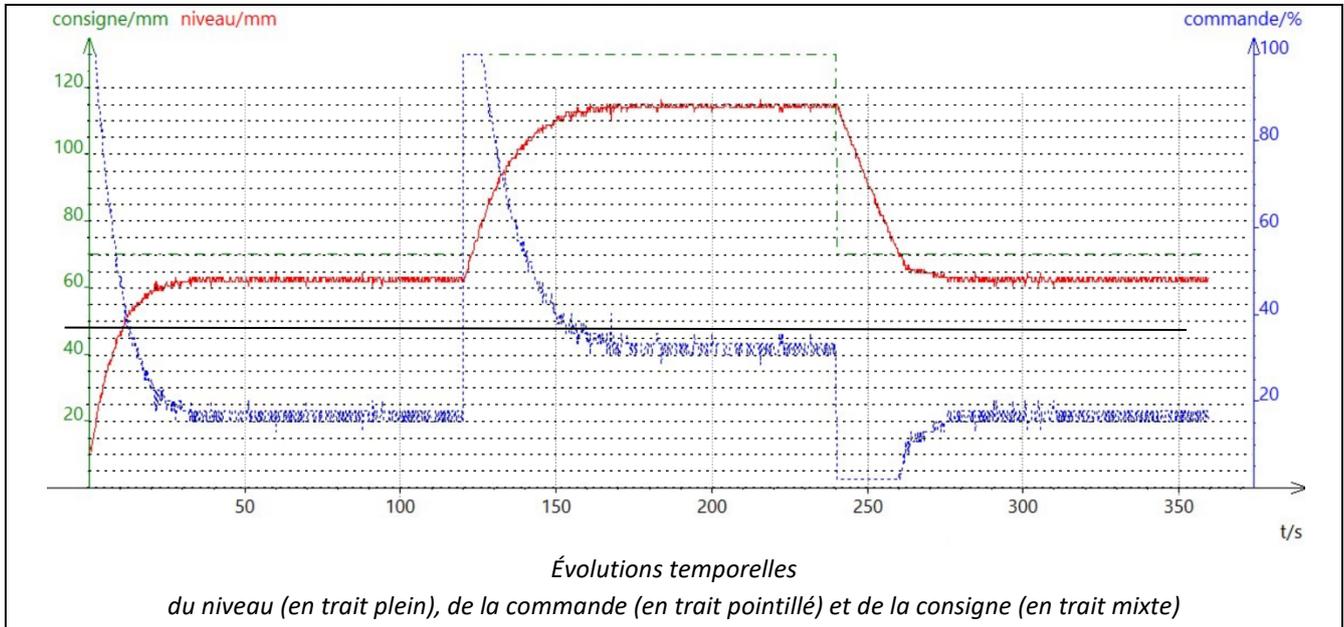




Le système de chauffage a une certaine inertie : quand le chauffage est arrêté, l'eau reste relativement chaude un certain temps et quand le chauffage se met en marche, l'eau reste relativement froide un certain temps.

EXERCICE 9 : Régulation proportionnelle d'un niveau d'eau

Lors de l'étude de la régulation proportionnelle d'un niveau d'eau dans un réservoir du type *maquette d'un château d'eau*, avec un gain proportionnel de 2, on obtient l'enregistrement suivant :



1. Compléter le tableau ci-dessous pour chacun des deux premiers régimes permanents.

	1 ^{er} régime permanent	2 ^e régime permanent	3 ^e régime permanent
consigne h_0	$h_0 = 70 \text{ mm}$	$h_0 = 130 \text{ mm}$	
niveau h	$h = 62 \text{ mm}$	$h = 114 \text{ mm}$	
écart statique ε_s	$\varepsilon_s = 70 - 62 = 8 \text{ mm}$	$\varepsilon_s = 130 - 114 = 16 \text{ mm}$	
signal de commande Y	$Y = 16 \%$	$Y = 32 \%$	

2. Donner l'expression du signal de commande dans le cas de cette régulation proportionnelle pour le 2^e régime permanent (où $h_0 = 130 \text{ mm}$).

Pour cette régulation proportionnelle :

$$Y = G_P \times (h_0 - h) = 2 \times (130 - h)$$

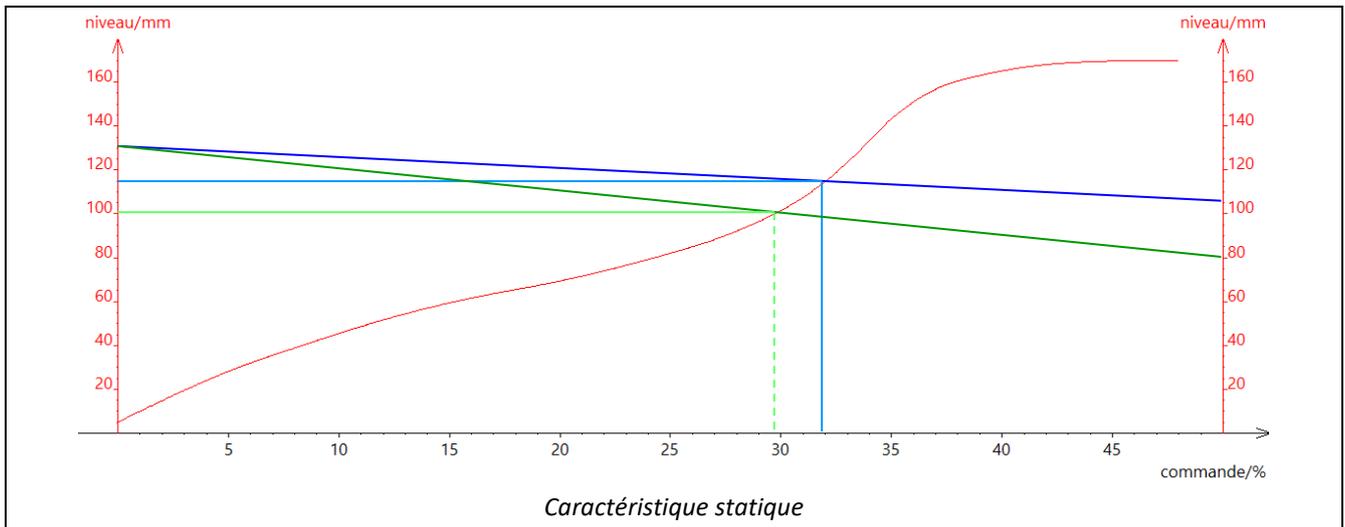
(tant que $h < h_0$ sinon $Y = 0$)

3. À partir de la réponse à la question précédente, et en utilisant la caractéristique statique ci-dessous, tracer la caractéristique du régulateur et en déduire la valeur du niveau d'eau et du signal de commande obtenue à la question 1, pour le 2^e régime permanent (où la consigne est $h_0 = 130 \text{ mm}$).

$$Y = 2 \times (130 - h) \text{ donc } h = -Y/2 + 130 \text{ soit } h = -0,5 \times Y + 130$$

il s'agit d'une droite passant par $(Y = 0 \%, h = 130 \text{ mm})$ et $(Y = 50 \%, h = -0,5 \times 50 + 130 = 105 \text{ mm})$

(voir tracé en bleu) on retrouve bien $h = 114 \text{ mm}$ et $Y = 32 \%$.



4. Avec la même méthode, déterminer le niveau d'eau en régime permanent et l'écart statique si la consigne vaut toujours 130 mm mais que le gain proportionnel vaut 1.

$$Y = 1 \times (130 - h) = 130 - h \quad \text{donc} \quad h = -Y + 130$$

il s'agit d'une droite passant par $(Y = 0\%, h = 130 \text{ mm})$ et $(Y = 50\%, h = -50 + 130 = 80 \text{ mm})$

(voir tracé en vert) on trouve $h = 100 \text{ mm}$

et donc $\varepsilon_s = 130 - 100 = 30 \text{ mm}$. L'écart statique est d'autant plus grand que le gain proportionnel est faible.

5. Quel serait le niveau d'eau en régime permanent et l'écart statique si la consigne était toujours 130 mm mais que la régulation était de type PI avec des paramètres bien adaptés?

Si la régulation était de type PI, du fait de la correction intégrale l'écart statique en régime permanent serait nul ($\varepsilon_s = 0$) et le niveau d'eau serait $h = h_0 = 130 \text{ mm}$ à la condition que la facteur K_i soit bien réglé (risque d'oscillation si K_i est trop faible par exemple).