



Régulation de la température de cuve de fermentation du vin

Bernard STRAUDO

Table des matières

1. Objectifs	3
2. Présentation	4
3. Données	5
4. Exercice : Étude préliminaire du système	6
5. Exercice : Dimensionnement du refroidissement	7
6. Exercice : Étude du jumeau numérique	9
7. Exercice : Étude de différents systèmes de régulation	12
8. Exercice : Mise en œuvre d'une solution	13
Solutions des exercices	14

1. Objectifs

Compétences :

- **C41** Appréhender l'organisation fonctionnelle, structurelle et temporelle d'un bien
- **C42** Caractériser la chaîne de puissance et d'information

Savoir Physique Chimie

- **S4.7.1** Thermodynamique les fondamentaux
- **S4.8** Transferts thermiques

Tâches professionnelles

- **T 3.2** Proposer et/ou concevoir des solutions d'amélioration

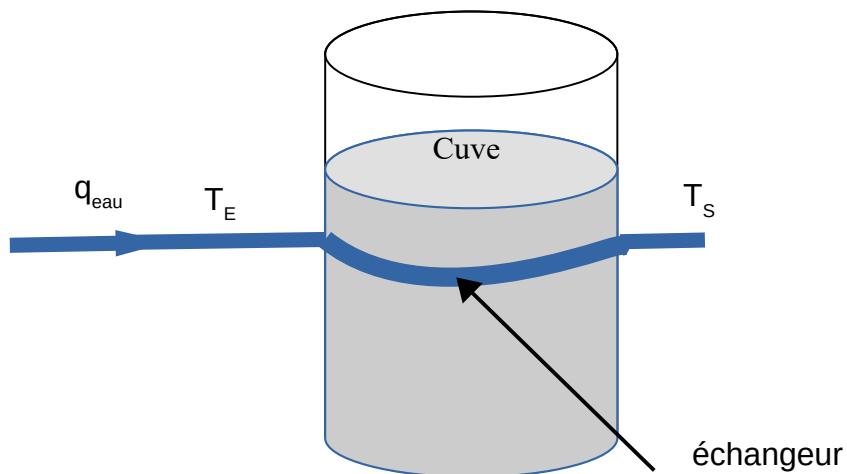
2. Présentation

Nous allons étudier la vinification des vins rouges. Pour que celle-ci se déroule correctement le moût (jus de raisin en fermentation) doit être maintenu à une température de 28°C sans jamais atteindre 33°C. En dessous de 28°C, les bactéries s'endorment et au-dessus de 33°C elles meurent.

La température de la salle dans laquelle se trouvent les cuves (en inox) sera considérée de 20°C.

Les cuves sont refroidies grâce à la circulation d'eau réfrigérée dans un échangeur entourant chaque cuve.

La régulation de la température est réalisée manuellement après lecture de la température du moût, le personnel laisse circuler un certain temps afin de maintenir la température dans la plage souhaitée. L'amélioration demandée est d'automatiser cette tâche.



3. Données

Débit de l'eau réfrigérée : $q_{\text{eau}} = 5 \text{ hl/h}$.

Coefficients d'échange entre la cuve et l'air est de 15 W.K^{-1} et entre la cuve et le vin 400 W.K^{-1}

Caractéristiques du moût (jus de raisin en fermentation)

$c_V = 0,886 \text{ kcal/kg/}^{\circ}\text{C}$ et masse volumique 1090 kg/m^3

Chaleur dégagée lors de la fermentation est de $0,017 \text{ W par litre}$

Caractéristiques de l'eau

Masse volumique : 1000 kg/m^3 $c_{\text{eau}} = 4180 \text{ J.kg}^{-1}.K^{-1}$

Caractéristiques de l'inox :

Conductivité thermique : $16 \text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$ Masse volumique : $7,9 \text{ g.cm}^{-3}$

Capacité thermique massique : $c_{\text{INOX}} = 450 \text{ J.kg}^{-1}.K^{-1}$

Résistance thermique (sans convection):

λ conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.K^{-1}$) e : épaisseur du matériau (m)

$$R = \frac{e}{\lambda S}$$

Résistance thermique (avec convection):

$$R = \frac{1}{h_1 S_1} + \frac{e}{\lambda S} + \frac{1}{h_2 S_2}$$

$S = S_1 = S_2$ surface d'échange, h_1 et h_2 coefficients d'échange entre la cuve et l'air est de 15 W.K^{-1} et entre la cuve et le moût 400 W.K^{-1} .

Dimensions de la cuve (en inox)

diamètre : $2,5 \text{ m}$ hauteur : 4 m épaisseur de la tôle : 2 mm

Rappel :

1 calorie = $4,1868 \text{ J}$ et $1 \text{ hl} = 100 \text{ l}$

4. Exercice : Étude préliminaire du système

Nous allons déterminer le volume et la surface d'échange de la cuve afin de déterminer ses caractéristiques thermiques, dans le but de vérifier le dimensionnement du système de refroidissement.

Question 1

[solution n°1 p. 14]

Donner l'expression du volume (V) de moût en fonction du diamètre (D) et de la hauteur (h_V) du vin dans la cuve. Calculer sa valeur numérique.

Question 2

[solution n°2 p. 14]

Donner l'expression de la masse de moût (m_V) présent dans la cuve en fonction de la masse volumique (ρ_V) du moût et du volume (V) de la cuve. Calculer sa valeur numérique (pour la hauteur maximum de moût).

Question 3

[solution n°3 p. 14]

Calculer la surface de la cuve.

5. Exercice : Dimensionnement du refroidissement

Notre étude portera pour une température de la cave de 20°C.

Dans en premier temps, nous ne tenons pas compte de la fermentation (hormis pour la dernière question).

Question 1

[solution n°4 p. 14]

Calculer la résistance thermique de la paroi (R_{TH}), sans tenir compte de la convection.

Question 2

[solution n°5 p. 14]

En déduire (R_{THT}) celle de la cuve en tenant compte de la convection.

Question 3

[solution n°6 p. 14]

Exprimer la capacité calorifique (C_V) du vin stocké dans la cuve en fonction de ρ_v , V et c_V . Calculer sa valeur en J.K⁻¹.

Question 4

[solution n°7 p. 14]

Exprimer la capacité calorifique (C_C) des tôles formant la cuve en fonction de m_C et c_{inox} . Calculer sa valeur en J.K⁻¹.

Question 5

[solution n°8 p. 14]

Comparer les valeurs des deux questions précédentes, laquelle peut-on négliger ?

Question 6

[solution n°9 p. 14]

Pour une température du vin de 28°C, calculer la puissance dissipée (sans circulation d'eau) au travers des parois de la cuve.

Question 7

[solution n°10 p. 15]

Dans le cas où le raisin, arrive dans la cuve à une température de 40°C, calculer l'énergie qui doit être évacuée pour le ramener à 28°C. La fermentation n'ayant pas débuté.

Question 8

[solution n°11 p. 15]

Donner l'expression, de l'énergie échangée (E_{ech}) pendant un temps (t) entre l'eau réfrigérée et la cuve en fonction du débit (q_{eau}) de l'eau réfrigérée, de sa masse volumique (ρ_e), du temps (t), de la capacité calorifique massique c_{eau} , de sa température à l'entrée (T_E) de l'échangeur et celle à la sortie (T_S).

Question 9

[solution n°12 p. 15]

En déduire l'expression de la puissance échangée (P_{ech}).

Question 10

[solution n°13 p. 15]

Si la différence de température de l'eau réfrigérée entre l'entrée et la sortie de l'échangeur est de 2°C ($T_S - T_E$), calculer la puissance échangée.

Question 11

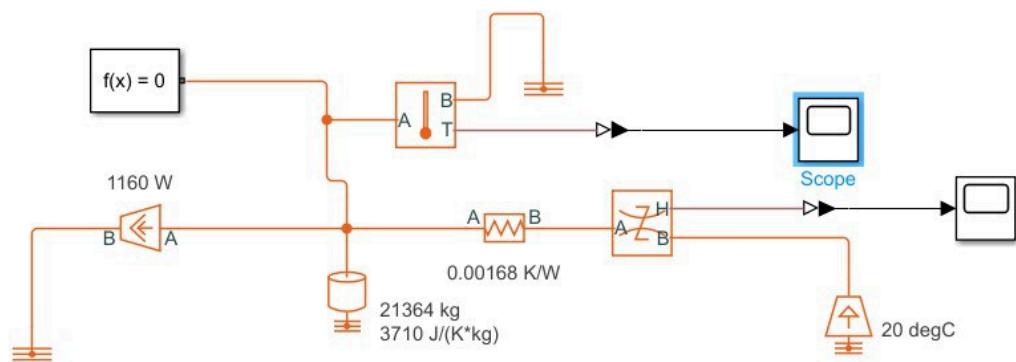
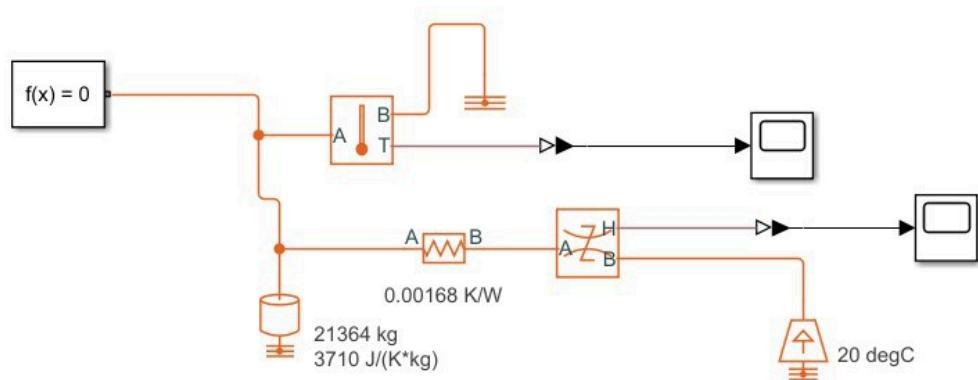
[solution n°14 p. 15]

Calculer la puissance thermique produite par la fermentation. La comparer à la valeur de la question précédente, et conclure la faisabilité d'une régulation à 28°C du moût, si la température de la cave est à 28°C .

6. Exercice : Étude du jumeau numérique

Nous avons réalisé deux modèles à l'aide du logiciel Matlab :

- un sans le système de refroidissement
- un avec le système de refroidissement



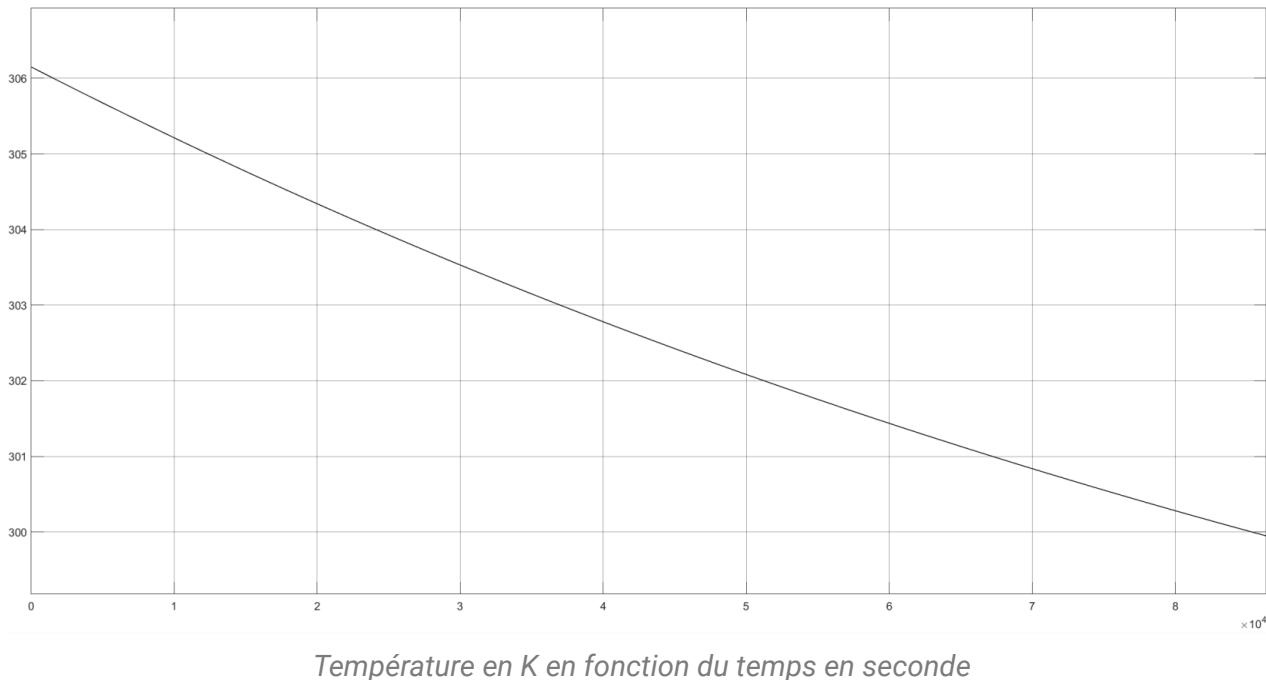
Question 1

[solution n°15 p. 15]

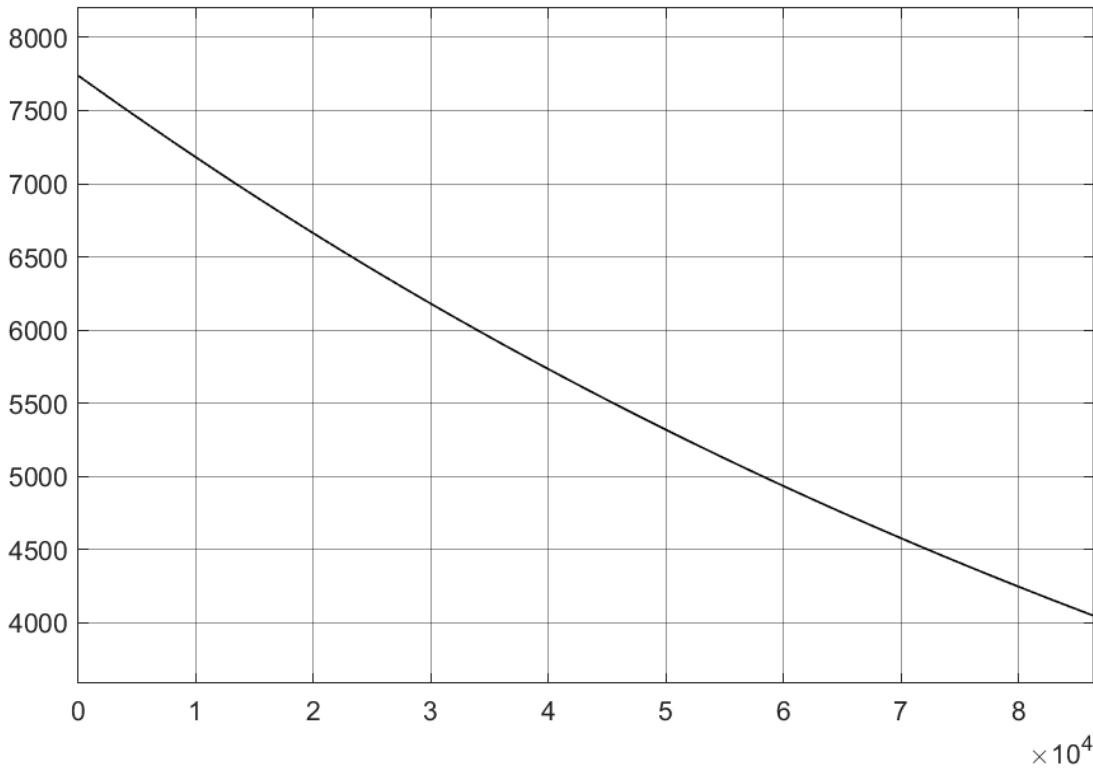
Montrer la cohérence entre le modèle et notre étude.

Étude sans refroidisseur

Avec le premier modèle.



Température en K en fonction du temps en seconde



Flux thermique en W en fonction du temps en seconde

Question 2

[solution n°16 p. 15]

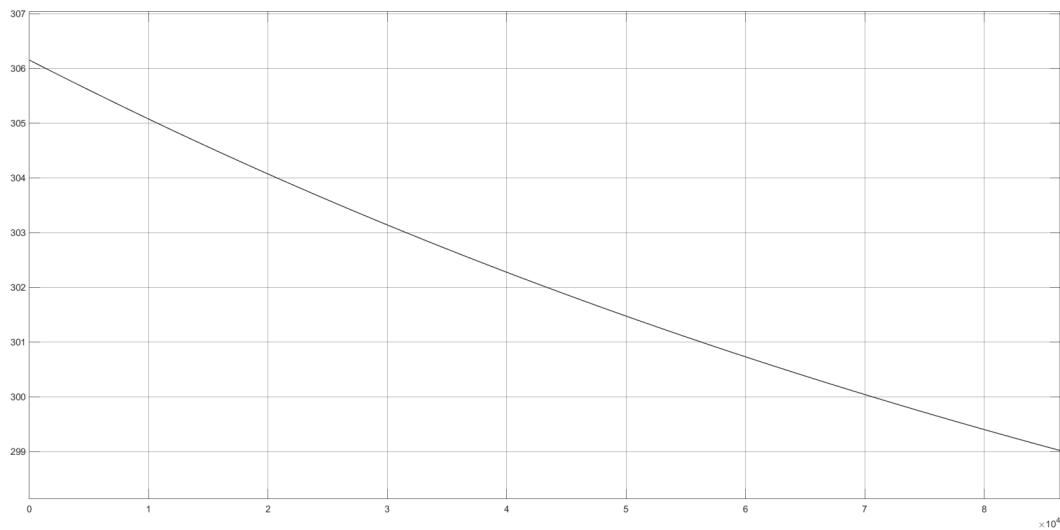
Déterminer le temps pour que le moût passe de 33°C à 28°C.

Question 3

[solution n°17 p. 15]

Vérifier la valeur calculée du flux thermique au travers de la cuve pour une température de 28°C.

Étude avec le refroidisseur



Température en K en fonction du temps en seconde avec refroidisseur

Question 4

[solution n°18 p. 16]

Que constatez-vous pour le temps pour atteindre 28°C.

7. Exercice : Étude de différents systèmes de régulation

Nous allons comparer deux systèmes pour réaliser la régulation. Un API eM4 *AU_NP_E4_Local-Eth_88981133-103_FR* (cf. *AU_NP_E4_Local-Eth_88981133-103_FR.pdf*) de chez Crouzet et un régulateur E5CK de chez Omron *E5CK* (cf. *E5CK.pdf*).

Question 1

[solution n°19 p. 16]

En étudiant les documentations fournies, citer les avantages et inconvénients de chaque solution.

Question 2

[solution n°20 p. 16]

Nous souhaitons que le système gère uniquement la régulation de la température et soit le plus simple à mettre en œuvre. Choisir parmi les deux solutions proposées celle qui correspond le mieux à nos contraintes.

8. Exercice : Mise en œuvre d'une solution

Dans cette partie, nous allons choisir le régulateur et réaliser sa mise en œuvre.

Nous utiliserons la documentation de la marque OMRON :(E5CK.pdf) (cf. E5CK.pdf)). Nous désirons des caches bornes sur le régulateur.

La mesure de la température sera réalisée à l'aide d'une sonde PT100. Nous désirons alimenter directement le régulateur en 230VAC. Un seul disjoncteur sera utilisé pour l'ensemble du système de régulation.

L'électrovanne et le voyant seront alimentés en 24VDC. Un voyant sera prévu pour indiquer une sortie de la température du moût de la plage 28°C à 33°C.

Question 1

[solution n°21 p. 16]

Proposer la référence du régulateur correspond au cahier des charges. Justifier votre réponse.

Question 2

[solution n°22 p. 16]

Vérifier que la plage de la température mesurable dans notre configuration est correcte pour notre utilisation

Question 3

[solution n°23 p. 16]

Indiquer le paramétrage à réaliser pour oUt1, oUt2 et ALt1.

Question 4

[solution n°24 p. 16]

Compléter le schéma suivant.

(cf. schema regulateur.pdf)

Solutions des exercices

[exercice p. 6] **Solution n°1**

$$V = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times h_V = \pi \left(\frac{2,5}{2}\right)^2 \times 4 = 19,6 \text{ m}^3$$

[exercice p. 6] **Solution n°2**

$$m_V = \rho_V \times V = 1090 \times 19,6 = 21364 \text{ kg}$$

[exercice p. 6] **Solution n°3**

$$S = \pi D \times h + \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times 2 = \pi \times 2,5 \times 4 + \pi \left(\frac{2,5}{2}\right)^2 \times 2 = 41,2 \text{ m}^2$$

[exercice p. 7] **Solution n°4**

$$R_{TH} = \frac{e}{\lambda S} = \frac{2 \times 10^{-3}}{16 \times 41,2} = 3,034 \times 10^{-6} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

[exercice p. 7] **Solution n°5**

$$R_{THT} = \frac{1}{h_1 \times S} + R_{TH} + \frac{1}{h_2 \times S} = \frac{1}{15 \times 41,2} + R_{TH} + \frac{1}{400 \times 41,2} = 1,68 \times 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

[exercice p. 7] **Solution n°6**

$$C_v = m_v \times c_v = \rho_v \times V \times c_v = 1090 \times 19,6 \times 4,1868 \times 0,886 \times 10^3 = 80 \text{ MJ} \cdot \text{K}^{-1}$$

[exercice p. 7] **Solution n°7**

$$C_c = m_c \times c_{inox} = \rho_{inox} \times V_c \times c_{inox} = 7,9 \times 10^{-3} \times 10^6 \times 450 \times 41,2 \times 2 \times 10^{-3} = 293 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1}$$

Avec $V_c = S \times e$

[exercice p. 7] **Solution n°8**

La capacité calorifique de la cuve en inox.

[exercice p. 7] **Solution n°9**

$$P = \frac{\Delta T}{R_{THT}} = \frac{28-20}{1,68 \times 10^{-3}} = 4,76 \text{ kW}$$

[exercicep. 7] **Solution n°10**

$$E = C_v \times \Delta T = 80 \times 10^6 \times (40 - 28) = 960 \text{ MJ}$$

[exercicep. 7] **Solution n°11**

$$E_{ech} = q_{eau} \times \rho_{eau} \times t \times c_{eau} \times (T_E - T_S)$$

[exercicep. 8] **Solution n°12**

$$P_{ech} = \frac{E_{ech}}{\Delta T} = q_{eau} \times \rho_{eau} \times c_{eau} \times (T_E - T_S)$$

[exercicep. 8] **Solution n°13**

$$P_{ech} = \frac{0,5}{3600} \times 1000 \times 4180 \times 2 = 1160 \text{ W}$$

[exercicep. 8] **Solution n°14**

$$E_{fermentation} = 0,017 \times 19,6 \times 10^3 = 333W$$

Si la cave est à une température de 28°C, la conductibilité des parois ne permet plus le refroidissement.

La puissance dégagée par la fermentation étant plus faible que le flux thermique de l'eau réfrigérée, le système pour compenser l'effet de la fermentation.

[exercicep. 9] **Solution n°15**

Nous retrouvons

- la masse du moût 21364 kg et sa capacité thermique massique 3710J/(K*kg).
- la résistance thermique de la cuve est de 0,00168 K/W entre A et B.
- la température de la cave 20°C.
- dans le deuxième modèle, le système de refroidissement d'une puissance de 1160 W.

[exercicep. 10] **Solution n°16**

33°C → 306 K et 28°C → 301

Le temps est d'environ 67500 s soit 18 h 45 min.

[exercicep. 10] **Solution n°17**

La température de 28°C est atteinte pour 67 500 s, et pour ce temps le flux thermique est de 4 750 W proche de la valeur calculée de 4 760 W.

[exercicep. 11] **Solution n°18**

Il est passé de 67 500 s à 57 500 s. Il a donc diminué.

[exercicep. 12] **Solution n°19**

	Avantages	Inconvénients
API	Permet d'ajouter des fonctions et offre une plus grande souplesse	Nécessite une programmation Nécessite un convertisseur pour la sonde PT100
Régulateur	Pas de programmation Pas besoin de convertisseur entre le régulateur et la sonde PT100	Permet seulement de gérer la régulation.

[exercicep. 12] **Solution n°20**

[exercicep. 13] **Solution n°21**

E5CK-RR1-500 AC100-240.

- RR car nous avons besoins d'un relais pour commander l'électrovanne.
- 500 car nous désirons des caches bornes
- AC100-240 pour l'alimentation en 240VAC.

[exercicep. 13] **Solution n°22**

La plage dans laquelle doit rester le moût est de 28°C à 33°C et le régulateur avec une sonde Pt100 permet -199,9 à 650,0°C. Donc, cela est convenable.

[exercicep. 13] **Solution n°23**

oUt1 : cold, car nous le fonctionnement est en froid

oUt2 : AL-1, car elle servira à allumer le voyant

ALt1 : 1, car nous désirons indiquer la sortie de la plage

[exercicep. 13] **Solution n°24**

(cf. schema regulateur correction.pdf)