

Brevet de Technicien Supérieur

**CONTRÔLE INDUSTRIEL
et
RÉGULATION AUTOMATIQUE**

U41 – Instrumentation et Régulation

Durée : 3 heures

Coefficient : 4

L'utilisation d'une calculatrice réglementaire est autorisée.

Calculatrice conformément à la circulaire n° 99-186 du 16/11/1999.

Aucun document autorisé.

Tout autre matériel est interdit.

*Avant de composer, assurez-vous que l'exemplaire qui vous a été remis est bien complet.
Ce sujet comporte 16 pages numérotées de 1/16 à 16/16.*

Les annexes 1, 4, 5 et 6 sont fournies en double exemplaire, un exemplaire étant à remettre avec la copie ; l'autre servant de brouillon éventuel.

Les 6 parties du sujet sont indépendantes et peuvent être traitées séparément. Il est cependant recommandé de les traiter dans l'ordre donné après avoir lu l'intégralité du sujet.

ÉTUDE D'UNE FABRICATION DE NYLON

DESCRIPTION DU PROCÉDÉ

Le nylon est fabriqué à partir de sel N, solution de deux substances chimiques : hexaméthylène diamine et acide adipique.

L'eau présente dans le sel N doit être éliminée par un **évaporateur**, chauffé à la vapeur. La polymérisation s'effectue ensuite dans le **réacteur** « finisseur », dont le système d'agitation n'est pas représenté.

Le schéma T.I. complet de l'installation est donné en **ANNEXE 1 pages 7 et 8/16**.

Le sel de nylon est soutiré puis envoyé sous 40 bar à des bobinoirs et un dispositif de granulation.

Les bobinoirs pouvant fonctionner en discontinu (cassé ou désengagement), le système de granulation permet alors de maintenir le réacteur en production continue, par débit plus élevé pour la granulation.

SPÉCIFICATIONS DE L' APPAREILLAGE

Repère	Caractéristiques
V2, V3	Vannes Camflex DN 3" – Convertisseur 4-20 mA / 0,2-1 bar - Type NO
V1, V4	Vanne Schlumberger DN 1"– Convertisseur 4-20 mA / 0,2-1 bar – Type NF
P	Pompe volumétrique à engrenage 750 cc de marque Fenpruff
M	Motoréducteur de marque Danfoss Bauer - Moteur asynchrone 15 KW
PY 3	Convertisseur Courant/Fréquence - Marque Lenze type 769 E31 15 KW

- Tous les transmetteurs sont exprimés en échelle 0-100 % et ont un mode de fonctionnement direct, c'est-à-dire que le signal représentant la grandeur physique varie dans le même sens que cette grandeur.
- La pression en sortie de pompe P augmente lorsque le signal de commande de la vitesse de rotation du moteur M augmente.

INSTRUMENTATION (7 points)

MESURE DE LA TEMPÉRATURE DU POLYMÈRE DANS LE RÉACTEUR FINISSEUR

Cette température est portée à 180 °C (température masse) par un fluide caloporteur à 250 °C, de débit Q_{cal} , circulant dans une double enveloppe - voir **ANNEXE 1 pages 7 et 8/16**.

1 - CHOIX DU CAPTEUR DE TEMPÉRATURE

Pour des raisons de qualité du produit fabriqué, on souhaite obtenir une précision de mesure de 0,8 °C à la température de 200 °C. L'objectif de cette étude est d'obtenir cette précision sur une étendue de mesure de 0 à 300 °C, tout en minimisant les coûts de maintenance. Toutes les mesures de température sont obtenues à l'aide de capteurs de type Pt 100 en montage 3 fils.

1-1 Rappeler le principe physique de mesure de température par un capteur à sonde résistive Pt 100, et indiquer le rôle du montage 3 fils.

1-2 À l'aide de l'**ANNEXE 2 page 9/16**, donner la classe du capteur devant être choisi pour répondre au cahier des charges. Justifier.

CAE4IR

- 1-3 Compte tenu des impératifs économiques, on utilisera en fait un capteur de moindre précision. Donner l'erreur maximale de température à 200 °C si l'on utilise un capteur de classe B. En déduire la plage de valeurs limites qu'un régulateur affichera, pour une température réelle de 200 °C.

2 - PRINCIPE D'ABAISSEMENT DE RÉSISTANCE

Le principe consiste à placer une résistance de valeur élevée en parallèle sur le capteur, pour désensibiliser la dispersion de valeur, en cas de changement du capteur : ce dispositif permet de garantir l'interchangeabilité de tout capteur de la même classe. À l'aide d'un four d'étalonnage de grande précision, on mesure la valeur ohmique délivrée par le capteur choisi et, par une résistance de valeur adéquate placée en parallèle, on porte sa valeur fictive à la limite basse de sa précision.

- 2-1 La température du four est fixée à 200 °C. La résistance mesurée R_T du capteur de classe B par un ohmmètre de grande précision est de **175,43 Ω**.
À l'aide de l'**ANNEXE 3 page 10/16**, déterminer la valeur de température correspondante θ_T au 1/100 °C près, en utilisant la courbe de correspondance nominale.

- 2-2 À l'aide de l'**ANNEXE 3 page 10/16**, donner la valeur de résistance souhaitée R_S afin de se placer à la valeur entière de limite basse de précision, soit **198 °C**.

- 2-3 On place alors une résistance de correction R_C en parallèle avec celle du capteur dans la « tête » de ce dernier afin d'abaisser sa valeur de résistance par la relation :

$$\frac{1}{R_S} = \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_T}$$

- 2-3-1 Calculer la valeur de la résistance R_C (au centième d'Ohm près) afin d'obtenir la valeur de résistance souhaitée R_S .

- 2-3-2 On utilisera une résistance de valeur normalisée précise $R_C = 120,00 \text{ k}\Omega$.

- En déduire la valeur réelle de R_S .
- À l'aide de l'**ANNEXE 3 page 10/16**, déterminer la nouvelle valeur de température θ_S correspondante.
- Donner l'erreur absolue ϵ_A de la température mesurée θ_S par rapport à celle déterminée en 2-2.

3 - ÉTALONNAGE DU CONVERTISSEUR DE TEMPÉRATURE

On utilise un convertisseur TY1 de type Ohm/Courant 4–20 mA sur la ligne de mesure de température. Afin d'étalonner le convertisseur Ohm/Courant utilisé en montage 3 fils sur son entrée, on simulera le capteur Pt100 par une boîte de résistances à décades.

En laboratoire, les valeurs ohmiques mesurées de la résistance R_M aux valeurs d'échelle de température 0 et 200 °C sont respectivement $R_{M 0^\circ\text{C}} = 99,96 \Omega$ et $R_{M 200^\circ\text{C}} = 175,17 \Omega$.

- 3-1 Représenter le câblage complet du matériel nécessaire à l'étalonnage sur l'**ANNEXE 4 page 12/16 – à joindre à la copie**.

- 3-2 Tracer la courbe d'étalonnage obtenue sur l'**ANNEXE 4 page 12/16 – à joindre à la copie**. Compléter numériquement le graphe en abscisses et en ordonnées.

RÉGULATION (13 points)

4 - RÉGULATION DE PRESSION DANS L'ÉVAPORATEUR

L'évaporateur est une cuve chauffée par un débit de vapeur Q_{vapeur} . La concentration du polymère de débit Q_{poly} passe alors à 75 % de matière sèche. La température est maintenue constante en réglant la pression $P_{\text{vap.surch.}}$ dans le réacteur à 2,5 bar.

La régulation de pression dans l'évaporateur est assurée par un régulateur **PIC 2**, agissant sur les deux vannes **PV2** et **PV3** :

- L'une permet à la vapeur surchauffée (de débit $Q_{\text{vap.surch.}}$), issue de l'évaporateur, d'être recyclée dans un échangeur de température.
- L'autre libère la vapeur surchauffée à l'atmosphère si l'action sur la vanne PV2 est insuffisante.
- On précise que les deux vannes sont munies de positionneurs permettant de régler la plage d'ouverture de celles-ci.

4-1 Donner le nom de la stratégie de régulation réalisée.

4-2 Les sens d'action des vannes – à caractéristique linéaire – sont indiqués en page 2/16 du sujet. Préciser, par un raisonnement complet, pourquoi on peut se contenter d'un seul régulateur et déterminer son sens d'action. Justifier.

4-3 On désire que les deux vannes PV2 et PV3 soient commandées par le même signal Y_R issu du régulateur. Compléter sur l'**ANNEXE 1 page 8/16 – à joindre à la copie** - le schéma T.I. de cette stratégie en utilisant l'instrumentation PT2, PV2 et PV3.

4-4 Tracer sur l'**ANNEXE 5 page 14/16 – à joindre à la copie** – le diagramme de partage en % d'ouverture, sachant que le point de partage est fixé à 60 %.

5 - RÉGULATION DE TEMPÉRATURE ET DE PRESSION DU POLYMÈRE

La température du polymère dans le réacteur (mesurée par l'ensemble TE1 et TY1) est portée à 180 °C par action d'un régulateur de température **TIC 1** agissant sur le débit Q_{cal} du fluide caloporteur, de température 250 °C, au moyen de la vanne **TV1**.

5-1 Compléter sur l'**ANNEXE 1 page 8/16 – à joindre à la copie** - le schéma T.I. de cette stratégie de régulation en utilisant l'instrumentation TV1, TY1 et TE1.

5-2 Déterminer le sens d'action du régulateur de température **TIC 1**. Justifier.

Le polymère issu du réacteur « finisseur » est destiné à un conditionnement sous deux formes distinctes :

- Fabrication du nylon sous forme filaire grâce à des bobinoirs.
- Granulation (fabrication de grains de nylon) grâce à un injecteur I1.

Le débit de sortie $Q_{\text{poly } 90\%}$ du polymère est assuré par une pompe volumétrique. La pression de refoulement doit être maintenue à 40 bar par l'ensemble de commande PY3, M, P et pilotée par un régulateur **PIC 3**.

5-3 Compléter sur l'**ANNEXE 1 page 8/16 – à joindre à la copie** - le schéma T.I. de cette stratégie de régulation en utilisant l'instrumentation PY3, M, P et PT3.

5-4 Déterminer le sens d'action du régulateur de pression **PIC 3**. Justifier.

6 - RÉGULATION DE NIVEAU DU POLYMÈRE DANS LE RÉACTEUR

On souhaite assurer un débit continu de polymère $Q_{Poly\ 90\%}$ lorsque des bobines complètes de fils Nylon sont désengagées. On ajuste donc le débit de contournement vers l'injecteur I1, au moyen d'un régulateur **FIC 5** agissant sur la vanne **LV4**. L'ajustement de ce débit doit permettre de maintenir constant le niveau de polymère dans le réacteur, au moyen d'un régulateur **LIC4**.

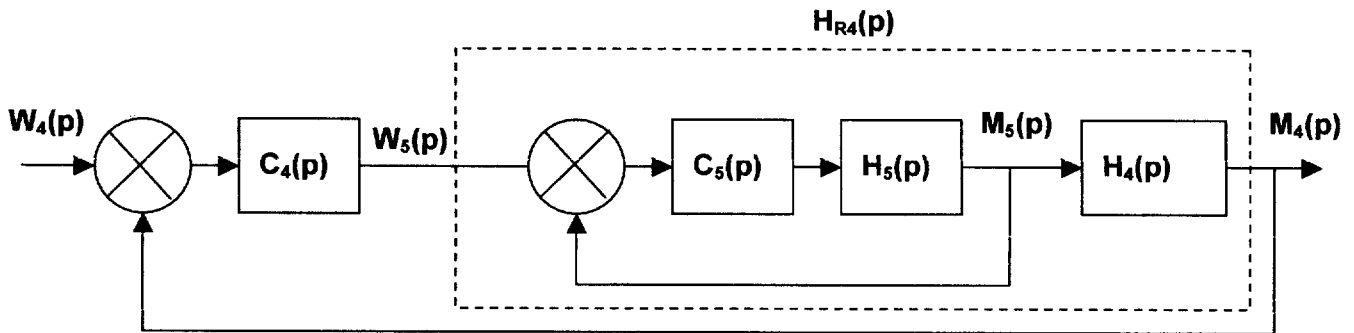
6-1 Donner le nom de la stratégie de régulation réalisée.

6-2 Compléter sur l'**ANNEXE 1 page 8/16 – à joindre à la copie** - le schéma T.I. de cette stratégie de régulation en utilisant l'instrumentation LV4, FT5 et LT4.

6-3 Déterminer les sens d'action des régulateurs de débit et de niveau. Justifier.

Le schéma fonctionnel de la régulation de niveau est le suivant :

Par souci de simplification, les signes utilisés sur ce schéma pour les comparateurs ne sont pas nécessairement ceux qui correspondent aux sens d'action déterminés à la question 6-3.



6-4 Réglage de la boucle **Interne** ou **Esclave**.

La boucle interne comprend les fonctions de transfert suivantes :

➤ $H_5(p) = \frac{K_5}{1 + \tau_5 \cdot p}$ avec $K_5 = 2,3$ et $\tau_5 = 130s$

➤ $C_5(p) = A_5 \cdot \frac{1 + Ti_5 \cdot p}{Ti_5 \cdot p}$ Correcteur PI série ou mixte

6-4-1 En choisissant judicieusement la valeur de la constante de temps d'intégration Ti_5 égale à la valeur de la constante de temps du procédé τ_5 , montrer que la fonction de transfert en boucle fermée de la régulation de débit $F_5(p)$ peut s'écrire sous la forme suivante :

$$F_5(p) = \frac{M_5(p)}{W_5(p)} = \frac{K_{BF5}}{1 + \tau_{BF5} \cdot p}$$

- Exprimer τ_{BF5} en fonction de A_5 , τ_5 et $\frac{K_5}{Ti_5}$ *Handwritten: K5 / Ti5 et tau5*
- Donner la valeur de K_{BF5} *Handwritten: K5 / Ti5*

6-4-2 On désire obtenir $\tau_{BF5} = 80s$. En déduire la valeur de l'amplification A_5 du correcteur. Donner la Bande Proportionnelle $X_{P5}(\%)$ correspondante.

Handwritten calculations:
 $\tau_{BF5} = \frac{K_5}{A_5 \cdot Ti_5} \cdot \tau_5 = 80$
 $\frac{2,3}{A_5 \cdot Ti_5} \cdot 130 = 80$
 $A_5 \cdot Ti_5 = \frac{2,3 \cdot 130}{80} = 3,6625$
 $X_{P5}(\%) = \frac{1}{A_5 \cdot Ti_5} = \frac{1}{3,6625} = 27,3\%$

6-5 Réglage de la boucle Externe ou Maître.

6-5-1 Le régulateur LIC4 étant en mode manuel, on génère un échelon de consigne de débit $w_5(t) = - 5 \%$. La réponse indicielle du niveau est donnée en **ANNEXE 6 page 16/16 - à rendre avec la copie.**

Identifier la fonction de transfert réglante $H_{R4}(p)$ par la méthode de Broïda sous la forme :

$$H_{R4}(p) = \frac{M_4(p)}{W_5(p)} = \frac{k}{p} \cdot e^{-T \cdot p}$$

Les temps seront exprimés en minutes et k en min^{-1} .

6-5-2

Quelle hypothèse doit-on faire pour pouvoir utiliser un gain dynamique k positif, dans la suite du problème ?

On utilisera donc les fonctions de transfert suivantes :

➤ Fonction de transfert réglante : $H_{R4}(p) = \frac{+0,3}{p} \cdot e^{-10p}$

➤ Fonction de transfert du correcteur $C_4(p)$ de type Proportionnel : $C_4(p) = A_4$

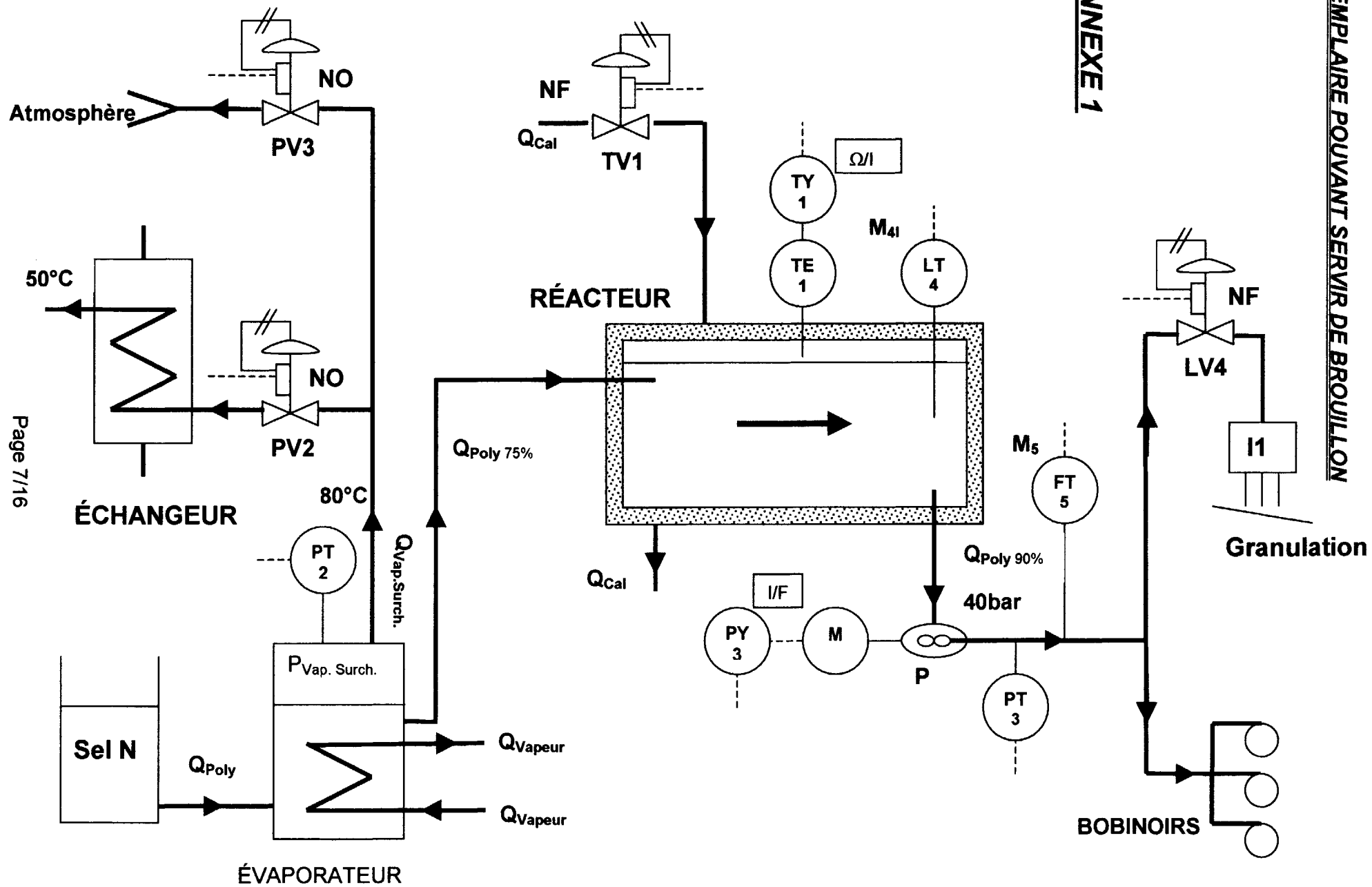
En déduire alors la fonction de transfert en boucle fermée $F_4(p) = \frac{X_4(p)}{W_4(p)}$, en

utilisant les formules habituelles pour un gain dynamique positif.

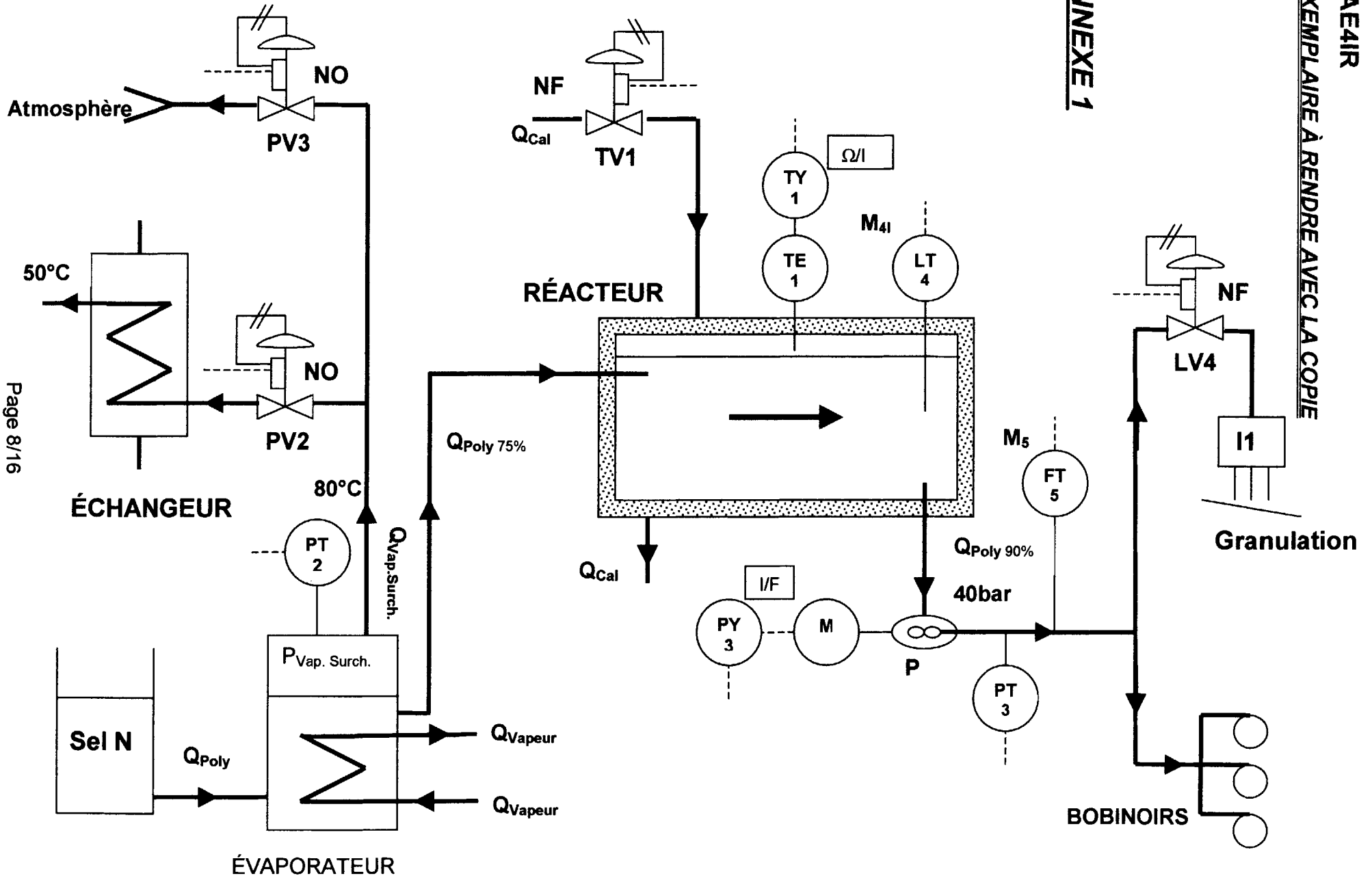
6-5-3 Le régulateur LIC4 étant désormais en mode automatique, on génère un échelon de consigne w_4 de 10%.

- Calculer $M_4(p)$
- Par le théorème de la valeur finale, en déduire la valeur finale de $m_4(t)$.
- Conclure sur la précision statique d'une stratégie utilisant un régulateur en mode **Proportionnel** seul.

ANNEXE 1



ANNEXE 1



ANNEXE 2

**Valeurs des tolérances pour éléments de 100 Ohms
Intervalle fondamental 38,5 ohms**

Température °C	Tolérance IEC 751:1983 (NF C 42-330, DIN 43760, BS 1904)			
	Classe A		Classe B	
	± °C	± Ohms	± °C	± Ohms
—200	0,55	0,24	1,3	0,56
—100	0,35	0,14	0,8	0,32
0	0,15	0,06	0,3	0,12
100	0,35	0,13	0,8	0,30
200	0,55	0,20	1,3	0,48
300	0,75	0,27	1,8	0,64
400	0,95	0,33	2,3	0,79
500	1,15	0,38	2,8	0,93
600	1,35	0,43	3,3	1,06
650	1,45	0,46	3,6	1,13
700	—	—	3,8	1,17
800	—	—	4,3	1,28
850	—	—	4,6	1,34

ANNEXE 3**Relation entre résistance et température dans la plage de -200°C à 300°C
pour élément sensible de thermomètre à résistance de platine**

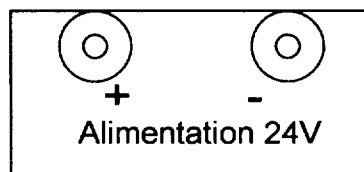
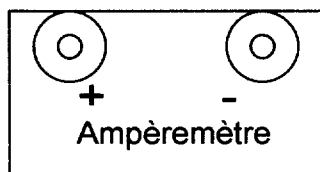
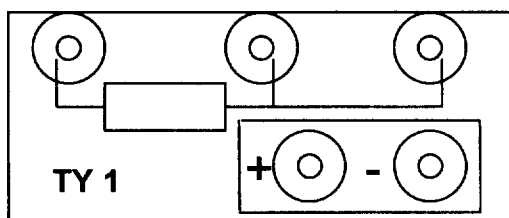
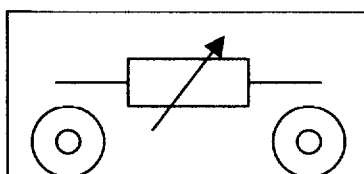
Tempé- rature	Ohms IEC 751:1983 (NF C 42-330, DIN 43760, BS 1904)				
	0	2	4	6	8
-200	18,49				
-190	22,80	21,94	21,08	20,22	19,36
-180	27,08	26,23	25,37	24,52	23,66
-170	31,32	30,47	29,63	28,78	27,93
-160	35,53	34,69	33,85	33,01	32,16
-150	39,71	38,88	38,04	37,21	36,37
-140	43,87	43,04	42,21	41,38	40,55
-130	48,00	47,18	46,35	45,52	44,70
-120	52,11	51,29	50,47	49,64	48,82
-110	56,19	55,38	54,56	53,74	52,92
-100	60,25	59,44	58,63	57,82	57,00
-90	64,30	63,49	62,68	61,87	61,06
-80	68,33	67,52	66,72	65,91	65,11
-70	72,33	71,53	70,73	69,93	69,13
-60	76,33	75,53	74,73	73,93	73,13
-50	80,31	79,51	78,72	77,92	77,13
-40	84,27	83,48	82,69	81,89	81,10
-30	88,22	87,43	86,64	85,85	85,06
-20	92,16	91,37	90,59	89,80	89,01
-10	96,09	95,30	94,52	93,73	92,95
0	100,00	99,22	98,44	97,65	96,87
0	100,00	100,78	101,56	102,34	103,12
10	103,90	104,68	105,46	106,24	107,02
20	107,79	108,57	109,35	110,12	110,90
30	111,67	112,45	113,22	113,99	114,77
40	115,54	116,31	117,08	117,85	118,62
50	119,40	120,16	120,93	121,70	122,47
60	123,24	124,01	124,77	125,54	126,31
70	127,07	127,84	128,60	129,37	130,13
80	130,89	131,66	132,42	133,18	133,94
90	134,70	135,46	136,22	136,98	137,74
100	138,50	139,26	140,02	140,77	141,53
110	142,29	143,04	143,80	144,55	145,31
120	146,06	146,81	147,57	148,32	149,07
130	149,82	150,57	151,33	152,08	152,83
140	153,58	154,32	155,07	155,82	156,57
150	157,31	158,06	158,81	159,55	160,30
160	161,04	161,79	162,53	163,27	164,02
170	164,76	165,50	166,24	166,98	167,72
180	168,46	169,20	169,94	170,68	171,42
190	172,16	172,90	173,63	174,37	175,10
200	175,84	176,57	177,31	178,04	178,78
210	179,51	180,24	180,97	181,71	182,44
220	183,17	183,90	184,63	185,36	186,09
230	186,82	187,54	188,27	189,00	189,72
240	190,45	191,18	191,90	192,63	193,35
250	194,07	194,80	195,52	196,24	196,96
260	197,69	198,41	199,13	199,85	200,57
270	201,29	202,01	202,72	203,44	204,16
280	204,88	205,59	206,31	207,02	207,74
290	208,45	209,17	209,88	210,59	211,31

Résistance Nominale:100 ohms à 0°C
Intervalle fondamental:38,5 ohms

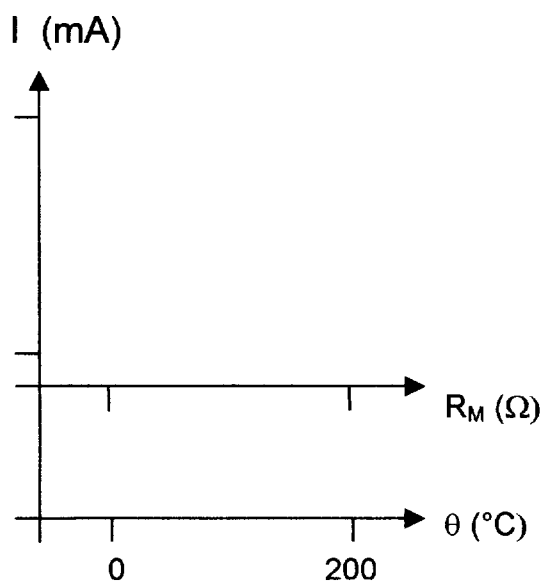
ANNEXE 4

MONTAGE D'ÉTALONNAGE

Boîte de résistances



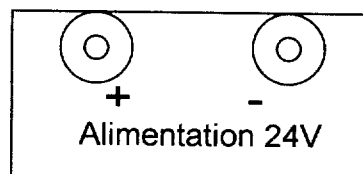
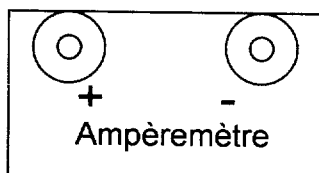
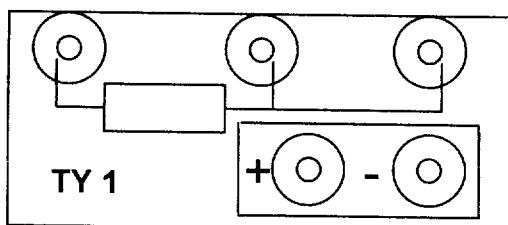
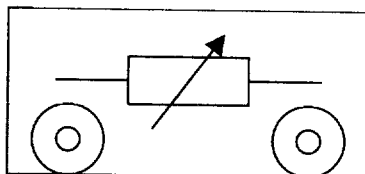
COURBE D'ÉTALONNAGE



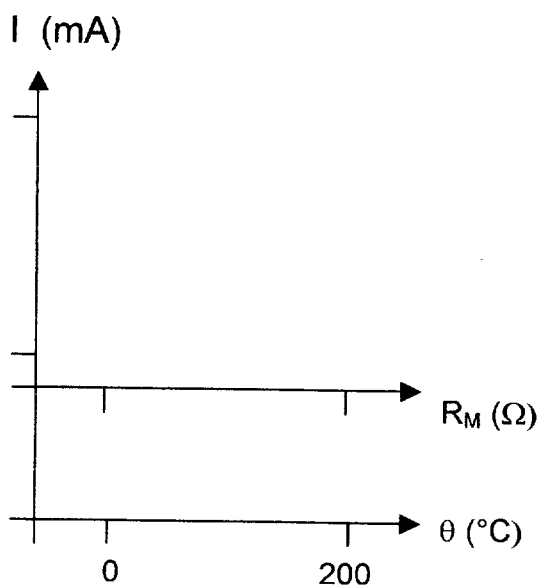
ANNEXE 4

MONTAGE D'ÉTALONNAGE

Boîte de résistances

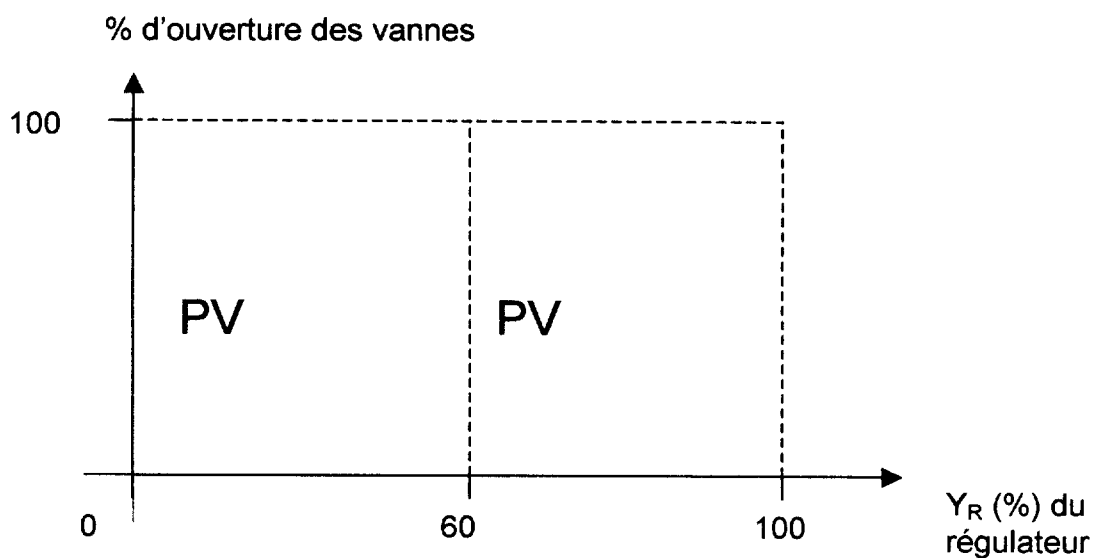


COURBE D'ÉTALONNAGE



ANNEXE 5

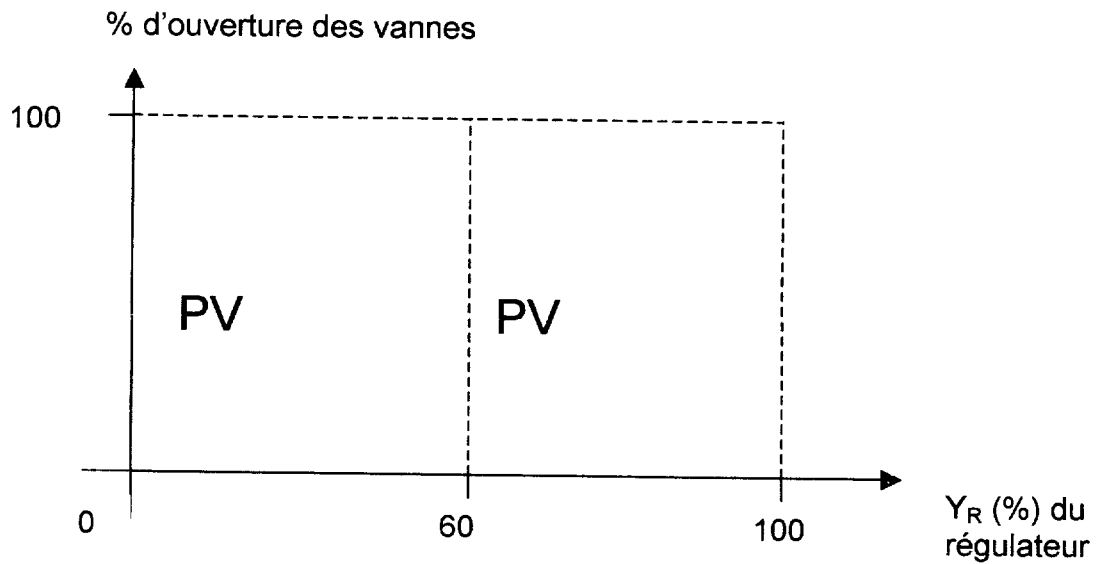
CARACTÉRISTIQUE DES VANNES PV2 et PV3
Diagramme de Partage d'échelle



**Indiquer la dénomination de la vanne concernée - PV2 ou PV3 -
sur chaque caractéristique**

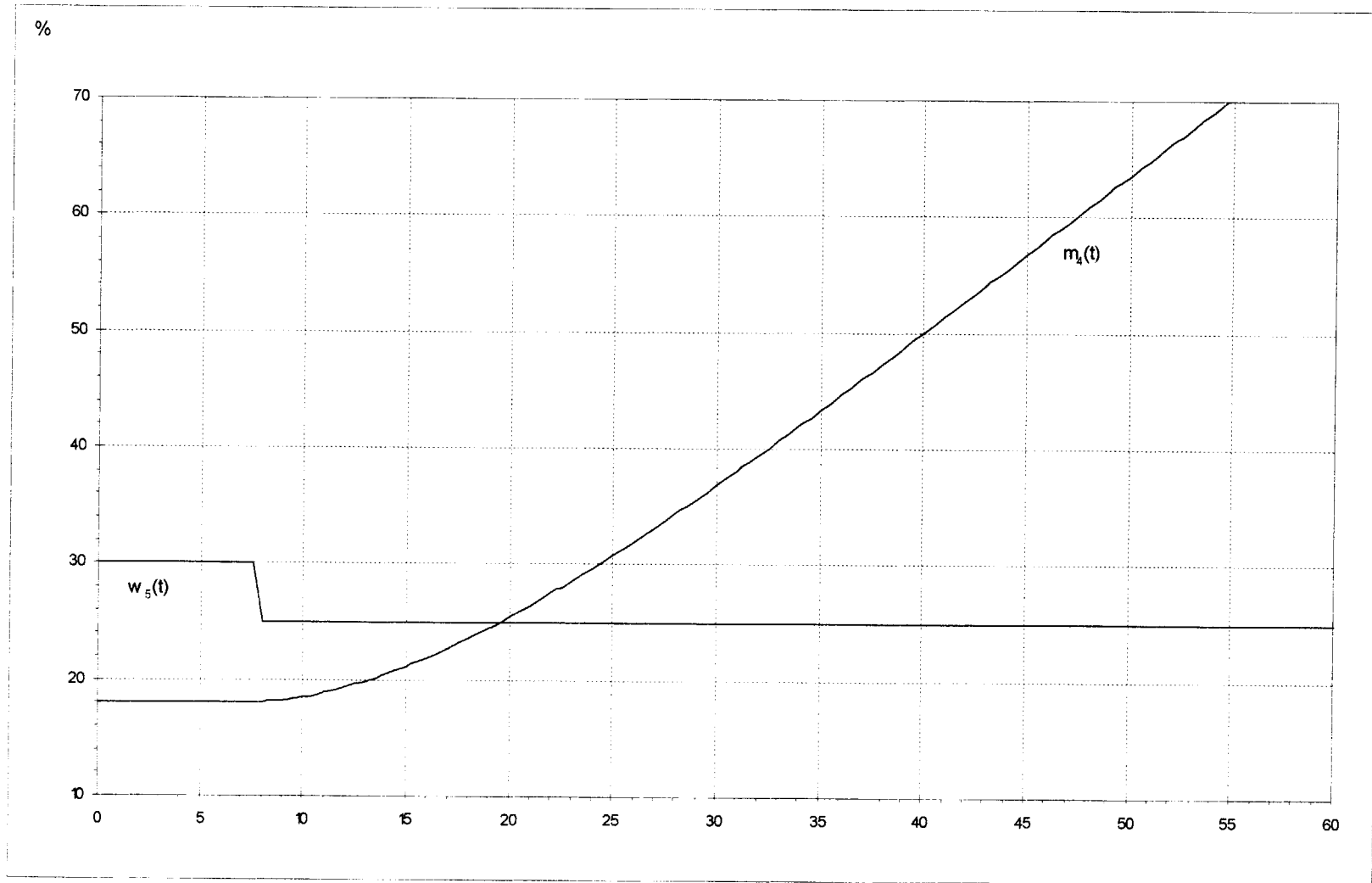
ANNEXE 5

CARACTÉRISTIQUE DES VANNES PV2 et PV3
Diagramme de Partage d'échelle



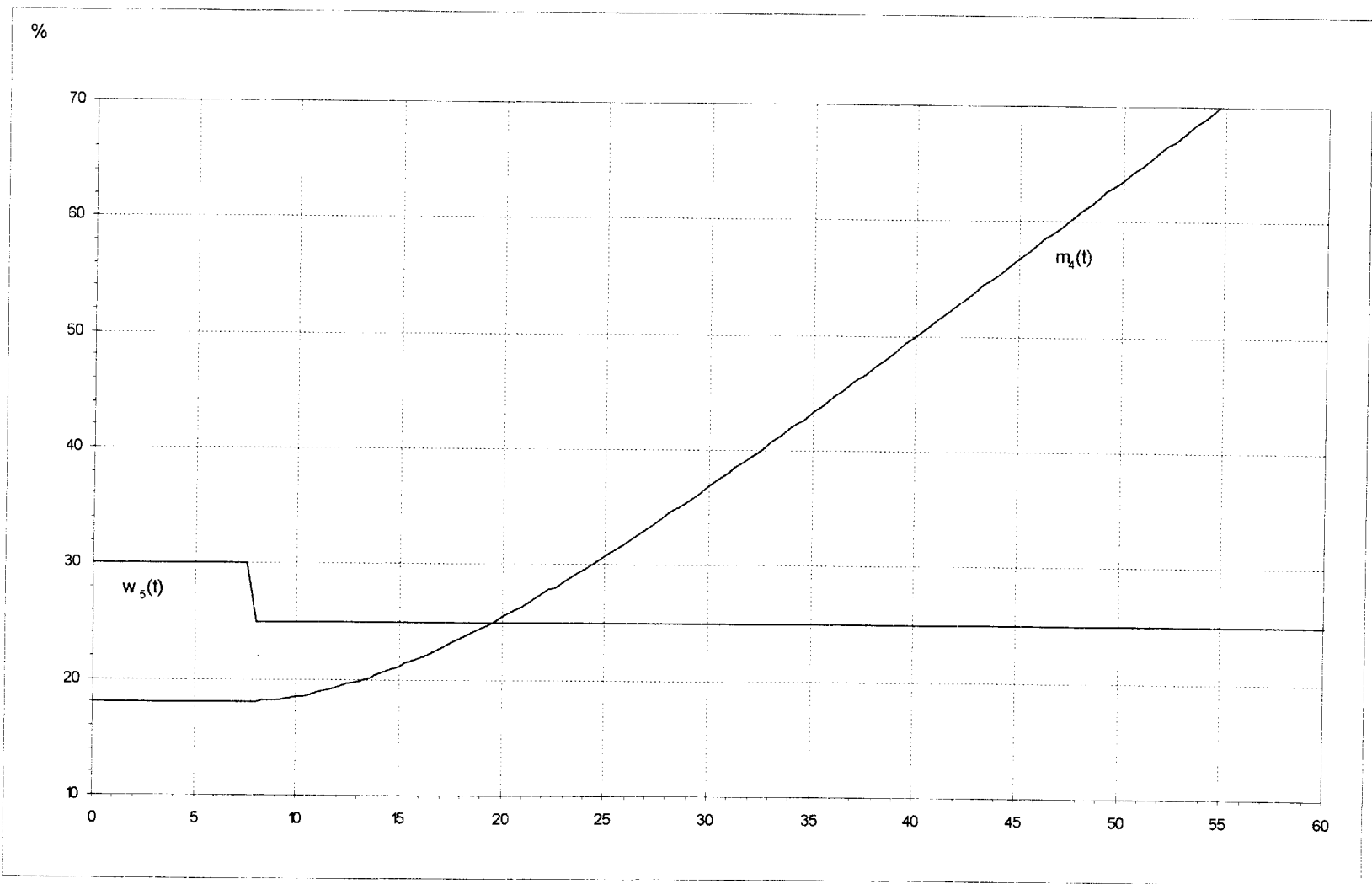
**Indiquer la dénomination de la vanne concernée - PV2 ou PV3 -
sur chaque caractéristique**

ANNEXE 6



Les unités en abscisses sont exprimées en minutes (min).

ANNEXE 6



Les unités en abscisses sont exprimées en minutes (min).