

**SESSION DE 2000****concours externe  
de recrutement de professeurs agrégés****section : génie mécanique**

composition d'automatismes industriels

**Durée : 6 heures**

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

Tout document et tout autre matériel électronique sont interdits.

En aucune façon, la calculatrice ne pourra posséder de données scientifiques et techniques propres au génie mécanique et à l'automatique.

Cette épreuve comporte :

- 4 pages de présentation du sujet,
- 2 parties d'énoncé (A et B) comprenant chacune 4 sous-parties indépendantes,
- 3 documents réponse (partie A) à joindre aux copies,
- 1 annexe en 5 pages (partie A) et 1 annexe en 4 pages (partie B).

*Le candidat traitera chacune des parties (partie A et partie B) sur des copies séparées en indiquant sur chacune d'entre elles le numéro de la partie traitée.*

*Les candidats sont par ailleurs invités à formuler toutes les hypothèses qu'ils jugeront nécessaires pour répondre aux questions posées. Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale dans sa copie et poursuit sa composition en indiquant les raisons de son initiative.*

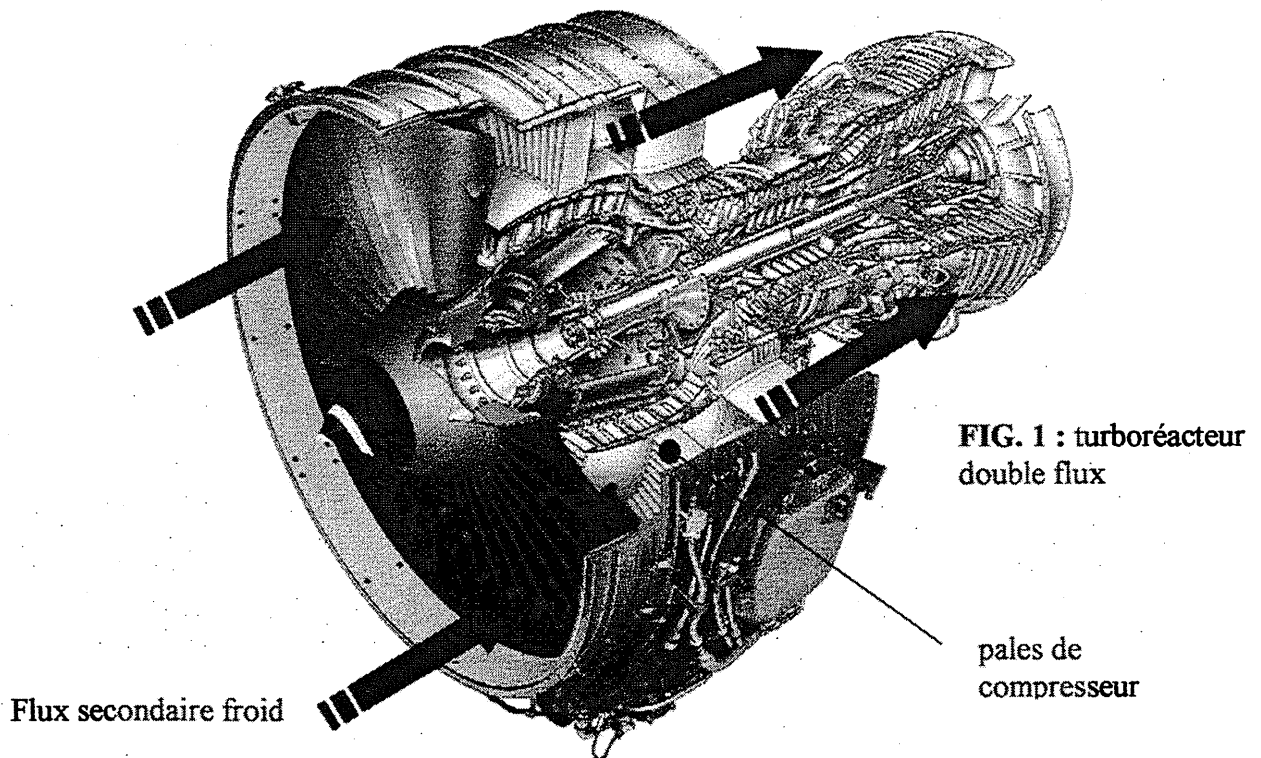
Tournez la page S.V.P.

## Présentation générale du sujet

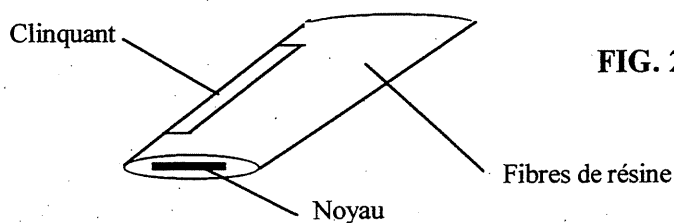
### PRESSE DE COMPRESSION POUR PALES DE COMPRESSEUR DE FLUX

#### Contexte

Afin d'améliorer le rendement de propulsion d'un turboréacteur et accessoirement la consommation et le bruit des moteurs utilisés dans l'aviation commerciale, ceux ci sont dotés du dispositif de double flux. il s'agit essentiellement d'adjoindre au flux principal, un flux secondaire froid qui vient se mélanger aux gaz de combustion, directement dans la tuyère d'éjection.



Les pales de compresseur de flux subissent des contraintes mécaniques et thermiques importantes. Compte tenu de ces contraintes et de la masse souhaitée, elles sont constituées d'un assemblage hétérogène de matériaux composites. Le noyau, en résine époxy, est enrobé de fibres de verre et de carbone préimprégnées. Sur le bord d'attaque de la pale est placé un clinquant réalisé en feuillard d'innox.



Tournez la page S.V.P.

### Gamme de fabrication des pales :

Les pales sont fabriquées à raison de 1600 par mois. Le processus de fabrication comprend les différentes opérations suivantes (les contrôles entre les différentes opérations ne sont pas précisés ici) :

<b>1- Drapage</b> Enrober manuellement le noyau en résine époxy de couches de fibres préimprégnées.	
<b>2- Passage en étuve</b> Amener les fibres et résine à une température de 20° pour assouplir les tissus.	
<b>3- Précompactage</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Pré-positionner les tissus</li><li>• Compression</li><li>• Positionnement clinquant et film de colle</li><li>• Presser</li></ul>	 
<b>4- Cuisson / compression de 10 pales (3h 45min)</b>	
<b>5- Nettoyage du clinquant</b> Enlever la résine du clinquant	
<b>6- Assemblage par paire à l'aide d'une plate-forme en polyuréthane injecté</b>	
<b>7- Post cuisson à 105° pendant 16h</b> Libérer les contraintes internes	
<b>8- Usinage des plates-formes</b>	
<b>9- Contrôle sur MMT (100%)</b>	
<b>10- Expédition de lots de pales</b>	



## La cuisson / compression des pales

On s'intéressera dans la suite du sujet à l'opération de cuisson / compression des pales.

Cette opération s'effectue sur une presse hydraulique de compression munie de plateaux chauffants.

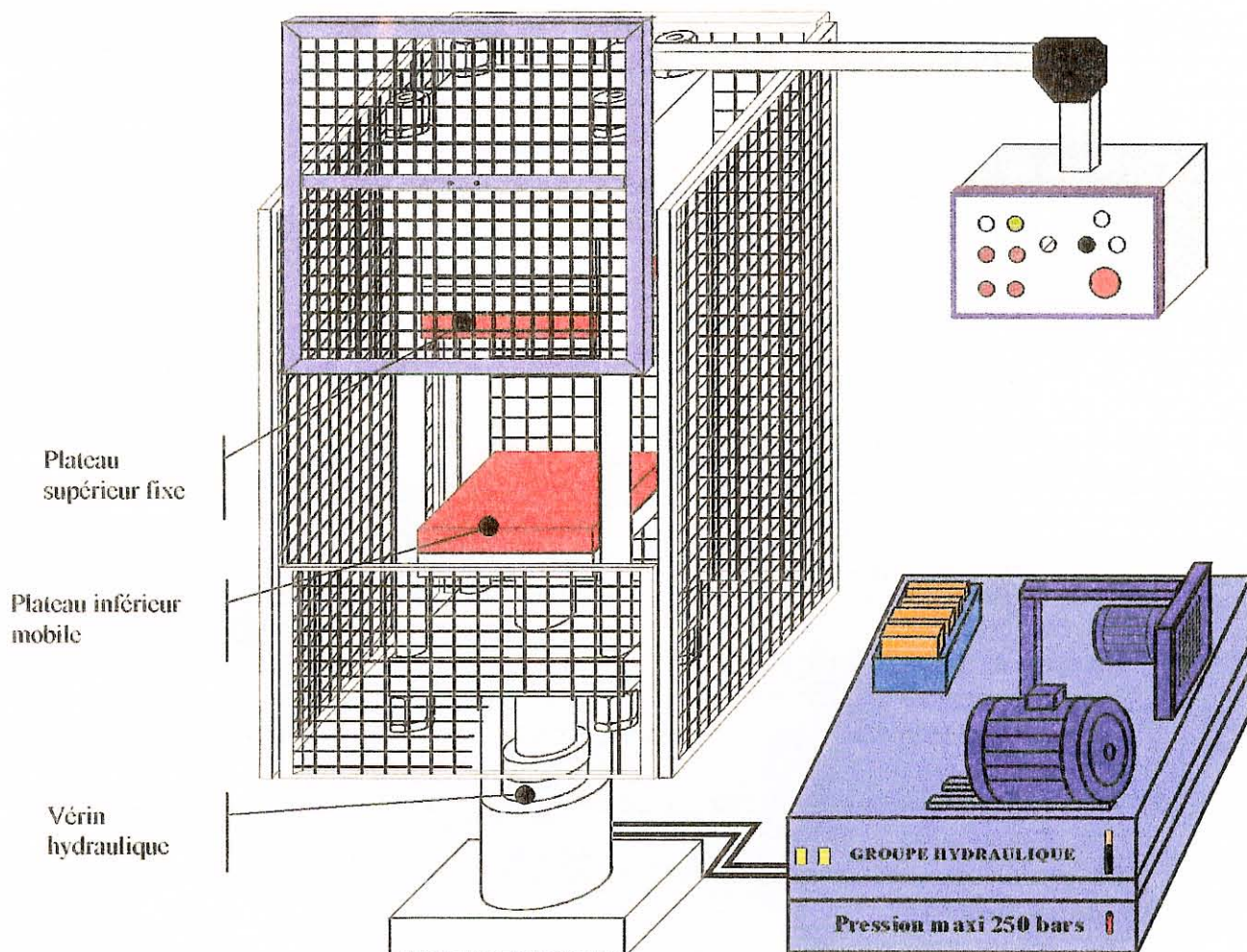


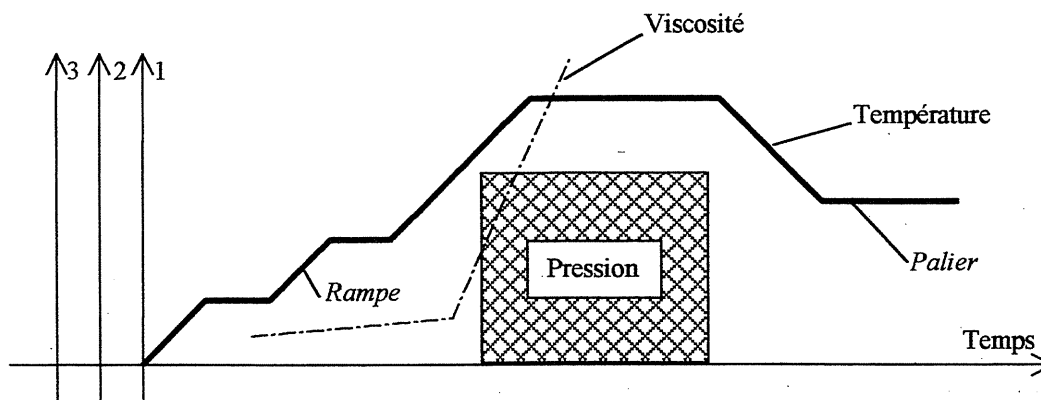
FIG. 3 : presse hydraulique

Cette presse hydraulique (voir figure 3) est conçue pour le moulage en compression. Elle possède un plateau supérieur fixe et un plateau inférieur mobile. Un vérin hydraulique assure le déplacement de ce plateau mobile et le verrouillage du moule.

Les plateaux possèdent des éléments chauffants, ce qui nécessite une isolation thermique de ceux-ci par rapport au bâti de la presse.

Tournez la page S.V.P.

La cuisson des matériaux composites Hautes Performances exige la maîtrise de la pression à l'intérieur du moule ainsi que le respect du cycle désiré en température (voir figure 4). La presse étudiée (voir figure 3) permet de répondre à ces exigences.



1 Température en degré Celsius

2 Pression en bar

3 Viscosité en poiseulle

FIG. 4 : cycle de cuisson

### Le cycle de moulage

Un cycle de moulage comporte les phases suivantes :

- déplacement du plateau inférieur ;
- mise en température du moule par chauffage électrique et refroidissement par air, air + eau ou eau ;
- régulation de la pression dans le moule ;

La gestion des opérations consiste à coordonner ces phases en fonction du cycle de fabrication préconisé .

Fonction	Critère	Niveau	Flexibilité
FS1 : Chauffer les plateaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durée d'un cycle de cuisson</li> <li>• Type de chauffage</li> <li>• Régulation de température</li> <li>• Vitesse de chauffe</li> <li>• Type de refroidissement</li> <li>• Vitesse refroidissement</li> </ul>	3h Résistances électriques $180 \pm 5^{\circ}\text{C}$ $10^{\circ}\text{C/mn}$ Air, air + eau, eau $5^{\circ}\text{C/mn}$	F1 F0 F0 F0 F0 F0
FS2 : Presser	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pression maximale au niveau de la matière dans le moule</li> <li>• Vitesse d'ouverture et de fermeture (Vitesse de travail)</li> <li>• Vitesse d'approche</li> </ul>	$2 \text{ à } 7 \pm 0.3 \text{ bar}$ min. : 5 mm/mn max. : 20 mm/mn 3000 mm/mn	F0 F1 F1 F1

TAB. 1 : Eléments de cahier des charges fonctionnel concernant les thermodurcissables

**PARTIE A**

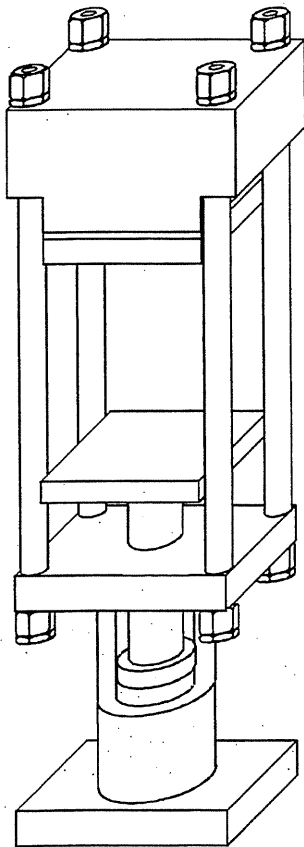
**Tournez la page S.V.P.**

## PARTIE A

(Etude de l'automatisme)

### Sous-partie A1 : Etude du circuit hydraulique

La compression des pales s'effectue à l'aide d'un vérin hydraulique. Les caractéristiques de cette opération sont précisées dans le tableau 1 de la partie "Présentation générale".



Caractéristiques du vérin :

- $\Phi$  du piston : 200 mm
- $\Phi$  de tige : 140 mm
- Course : 450 mm

Surface utile du moule : 930 cm<sup>2</sup>

FIG. A1 : vérin de compression

#### Question A1-1

La puissance du moteur électrique du groupe moto-pompe est donnée de 7,5 kW.

*Ce moteur est-il adapté au besoin ?*

(Pour cela, calculer :  
- la pression à appliquer sur le piston,  
- le débit nécessaire)

Tournez la page S.V.P.

Le groupe moto-pompe comprend deux circuits :

- un circuit "grande vitesse" délivrant un grand débit et une basse pression,
- un circuit "vitesse lente" délivrant un faible débit et une pression élevée.

On s'intéresse dans un premier temps au circuit hydraulique "grande vitesse" pour les vitesses d'approche (3000 mm/mn). Le schéma de cette partie du circuit hydraulique est donné dans le document réponse A-R1.

Montée en vitesse d'approche :

En position tige en bas, quand aucune bobine n'est excitée, l'huile retourne à la bêche par l'intermédiaire du distributeur (7). Quand la bobine du distributeur (7) et la bobine (a) du distributeur proportionnel (3) sont alimentées, l'huile arrive en chambre arrière du vérin et provoque ainsi la montée de la tige. L'huile de la chambre avant passe par le distributeur (3) et retourne au réservoir. A une position intermédiaire pré réglée (capteur de position), les bobines des distributeurs (7) et (3) sont désactivées et l'on passe sur le circuit des hautes pressions.

Descente en vitesse d'approche :

En position tige en haut, on descend en vitesse travail jusqu'à la position intermédiaire pré réglée. On passe alors sur le circuit basse pression. La bobine du distributeur (7) et la bobine (b) du distributeur (3) sont alimentées, l'huile rejoint la chambre avant et fait descendre la tige à une vitesse de 3000 mm/mn. L'huile de la chambre arrière passe par la valve de retenue de charges (6) puis par le distributeur (3) et finit dans le réservoir.

#### Question A1-2

*Quelle est la fonction du distributeur (7) ?*

#### Question A1-3

Le choix du distributeur proportionnel (3) est la référence 0811404001 (voir Annexe A1, folios 1 et 2).

*Compte tenu des caractéristiques recherchées, que pensez-vous du choix de ce distributeur ?*

*(Pour cela : - comparer son débit nominal à celui de la pompe,  
- en déduire la conséquence sur le  $\Delta p$ )*



Pour obtenir la vitesse lente, une deuxième pompe, accouplée au moteur du groupe, fournit le débit de 10 litres / mn.

Régulation du vérin en pression (voir document réponse A-R1) :

Une fois l'approche terminée, on passe sur le circuit haute pression. Pour cela, on coupe (7) et on pilote (5). La montée lente puis la régulation de pression sont obtenus en jouant sur (4). Le cycle terminé, l'ouverture des moules se réalise en donnant une nouvelle consigne à la bobine (4). L'ouverture en vitesse rapide s'obtient en coupant (5) et en pilotant (7) et (3b).

Résumé des conditions de fonctionnement :

Phases	Distrib. 7	Distrib. 3a	Distrib. 3b	Distrib. 4	Distrib. 5
Arrêt Haut ou bas pompe à vide					
Montée rapide		➔			
Ralentissement montée		➔			
Montée lente et asservissement pression				➔	
Descente lente				➔	
Descente rapide			➔		

	Bobine non excitée
	Bobine excitée
➔	Proportionnelle

Commentaire du tableau

**Question A1-4**

Compléter le schéma hydraulique (document réponse A-R1).

Sous-partie A2 : Etude de l'alimentation électrique.

Nous nous intéressons ici à l'alimentation électrique du groupe moto-pompe de la presse hydraulique, à savoir le circuit de commande et le circuit de puissance.

Le moteur du groupe (M1) est un moteur asynchrone triphasé de 7,5 kW. Une alimentation continue 230v AC / 24v DC fournit l'énergie nécessaire au circuit de commande (Voir document réponse A-R2).

L'ensemble des équipements électriques doit être conforme aux exigences techniques fixées par le code du travail portant notamment sur les risques électriques (article R.233-25), l'arrêt d'urgence (article R.233-28), la séparation des énergies (article R.233-29).

Le tableau ci-dessous précise les conditions de mise sous tension et d'arrêt de la partie opérative (contacteur KA PO).

Conditions de mise sous tension	Conditions d'arrêt
Bouton Mise en énergie de la PO (MeePO)	Bouton Mise hors énergie (MhePO) Arrêt d'urgence (AU) Sécurité porte (Sp) Sécurité température huile (Sth) Niveau d'huile (Nh)

**Question A2-1**

La mise en énergie de la partie opérative se fait par action sur le bouton poussoir MeePO.

*Compléter le schéma électrique de commande du moteur du groupe moto-pompe sur le document réponse A-R2.*

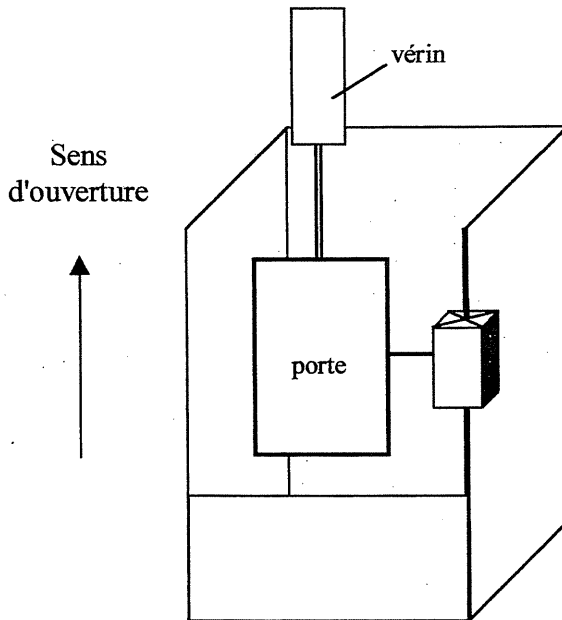
**Question A2-2**

*A partir du document constructeur (annexe A2) et compte tenu des caractéristiques du circuit de puissance du moteur du groupe moto-pompe, déterminer la référence du disjoncteur magnéto-thermique Dj Gmp.*

### Sous-partie A3 : Circuit pneumatique

La porte (ou grille) d'accès au moule constitue un élément déterminant pour la sécurité de la presse de compression.

C'est une liaison glissière disposée verticalement qui assure la mobilité de cette porte. La motorisation est assurée par un vérin pneumatique.



Caractéristiques générales :

- pression d'alimentation : 6 bar
- poids de la porte : 10 daN
- coefficient de sécurité : 2

Caractéristiques du vérin :

- énergie pneumatique
- double effet
- course : 600 mm

**FIG. A.3 : principe de fonctionnement de la porte**

#### Question A3-1

*Compte tenu des caractéristiques précisées, calculer le diamètre nécessaire du vérin pneumatique.*

*Déterminer dans la documentation constructeur (annexe A3), une référence de vérin satisfaisant les critères demandés. Expliquer votre choix.*

#### Question A3-2

Compte tenu des exigences liées à la sécurité, on demande que la porte puisse rester bloquée en cas de coupure d'énergie de commande (liée à une panne ou un arrêt d'urgence) ou de coupure d'énergie pneumatique.

*Proposer un schéma de câblage de l'alimentation pneumatique du vérin de porte.*

## Sous-partie A4 : Etude séquentielle

Dans cette sous-partie, on s'intéresse au GEMMA et au Grafcet qui décrivent le fonctionnement global de la presse.

### Question A4-1


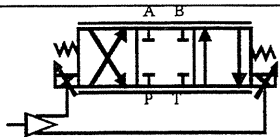
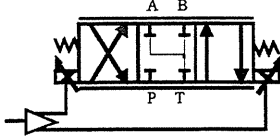
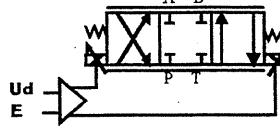
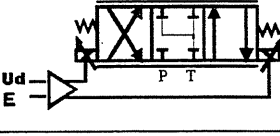
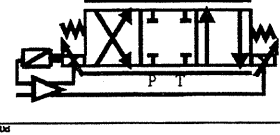
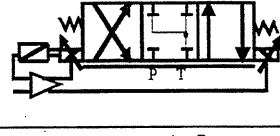
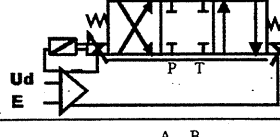
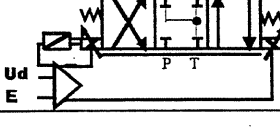
Le GEMMA partiel joint (annexe A4) présente un extrait des modes de marche et d'arrêt retenus pour la presse (blocs A1, F1, F4, F5).

*A partir de ce GEMMA partiel, élaborer le grafcet des modes de marche et d'arrêt.*

### Question A4-2

*Compléter le Grafcet de Production Normale (GPN) (document réponse A-R3), en mettant en place :*

- *une procédure d'arrêt de fermeture de grille en cas de détection d'obstacle.*
- *les liaisons entre ce GPN décrivant le fonctionnement séquentiel de la presse et les contrôles de régulations thermique et hydraulique,*

Symbole	 A/W (VA)	$\Delta p$ [bar]	Q <sub>nom</sub> [l/mn]		P <sub>max</sub> [bar]	Référence
			Q <sub>A</sub>	Q <sub>B</sub>		
 01	2,5/50 (R <sub>L</sub> =5,8Ω)	5	32	32	P, A, B 315 T : 250:	0 811 404 830
			63	63		0 811 404 832
 01+L			32*	32		0 811 404 831
			63	63		0 811 404 833
 01	24 V= max. 50 VA	5	35	35	P, A, B 315 T : 250:	0 811 404 852
			65	65		0 811 404 850
 01+L			35	35		0 811 404 853
			65	65		0 811 404 851
 01	3,7/50	5	32	32	P, A, B 315 T : 250:	0 811 404 003
			63	63		0 811 404 001
 01+L			32	32		0 811 404 081
			63	63		0 811 404 080
 01	24 V= max. 50 VA	5	50	50	P, A, B 315 T : 200:	0 811 404 770
			80	80		0 811 404 771
 01+L			50	50		0 811 404 772
			80	80		0 811 404 773

01+L : Position zéro avec drain des fuites.

### Annexe A1, folio 1

(Distributeurs proportionnels (document constructeur))

Tournez la page S.V.P.

**Caractéristiques**

**- générales**

Construction	Distributeur à tiroir
Commande	Aimant à action proportionnelle avec régulation de position
Raccordement	Embase selon plan de pose NG 10 (ISO 4401) + L
Position de montage	indifférente
Température ambiante	-20 ... +50°C

**- hydrauliques**

Fluide	Fluide hydraulique selon norme DIN 51 524 ... 535	
Viscosité, conseillée max. admissible	20 ... 100 mm <sup>2</sup> /s	
	10 ... 800 mm <sup>2</sup> /s	
Température du fluide	-20 ... +80°C	
Filtration  Selon sécurité de fonctionnement et durée de vie	Classe de pollution admissible du fluide selon NAS 1638	Avec un filtre $\beta_x = 75$
	8	X = 10
	9	20
	10	25
Sens d'écoulement	voir symbole	
Débit nominal (pour $\Delta p = 5\text{bar}$ )*	32, 35, 50 selon réf.	63, 65, 80 selon réf.
Fuites internes/Arête de distribution ( $\Delta p = 100\text{bar}$ )	A → T = 80 cm <sup>3</sup> /min B → T = 80 cm <sup>3</sup> /min	
Drainage de fuites internes ( $\Delta p = 5\text{bar}$ )	A → T = 0,4 ... 0,8 l/min	
	B → T = 0,4 ... 0,8 l/min	
Pression de service max.	Orifice P, A, B : 315 bar Orifice T : 250 bar Orifice L < 2 bar	

**- Electriques**

Facteur de marche réel	FM 100 %
Degré de protection	IP 65 selon norme DIN 40 050 et IEC 14 434/5
Branchement électro-aimant	par prise selon norme DIN 43 650 / ISO 4400
Branchement du capteur de position	Prise spéciale
Courant d'alimentation de l'électro-aimant	max. 3,7 A
Résistance de la bobine R20	2,5Ω
Consommation	max. 50W

**- Statiques / Dynamiques**

Hystérésis	< 0,75 %
Seuil d'inversion	< 0,5 %
Dispersion	~ 10 %
Temps de réponse pour une course de 100 % de 10 %	50ms
	20ms

Toute caractéristique en liaison avec l'amplificateur électronique proportionnel : WV60-RGC 2

**\* Débit nominal**

Toujours par rapport à une différence de pression à l'étranglement de  $\Delta p = 5 \text{ bar}$ .

Le débit pour d'autres différences de pression se calcule comme suit :

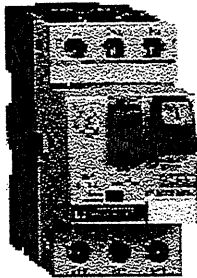
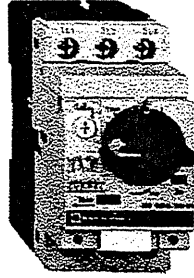
$$Q_x = Q_{\text{nom}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_x}{5}}$$

Il faut néanmoins tenir compte des limites d'utilisation. En cas de dépassement de ces plages d'utilisation, une pression trop élevée entraîne des déplacements de tiroir non contrôlés. L'utilisation de balances de pression permet de limiter en toute sécurité le  $\Delta p$ .

**Annexe A1, folio 2**

*(Distributeurs proportionnels (document constructeur))*



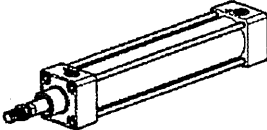
Applications	Protection des moteurs	
		
seuil de déclenchement sur court-circuit	environ 13 In	environ 13 In
puissance des moteurs en AC-3, 415 V	jusqu'à 15 kW	jusqu'à 15 kW
courant d'emploi e 415 V	0,1 ...32 A	0,1 ...32 A
pouvoir de coupure en 415 V (Icu) selon IEC 947-2	10 ... 100 kA	50 ... 100 kA
commande sur porte	sans	avec
type d'appareils	<b>GV2-M</b>	<b>GV2-P</b>

### Références :

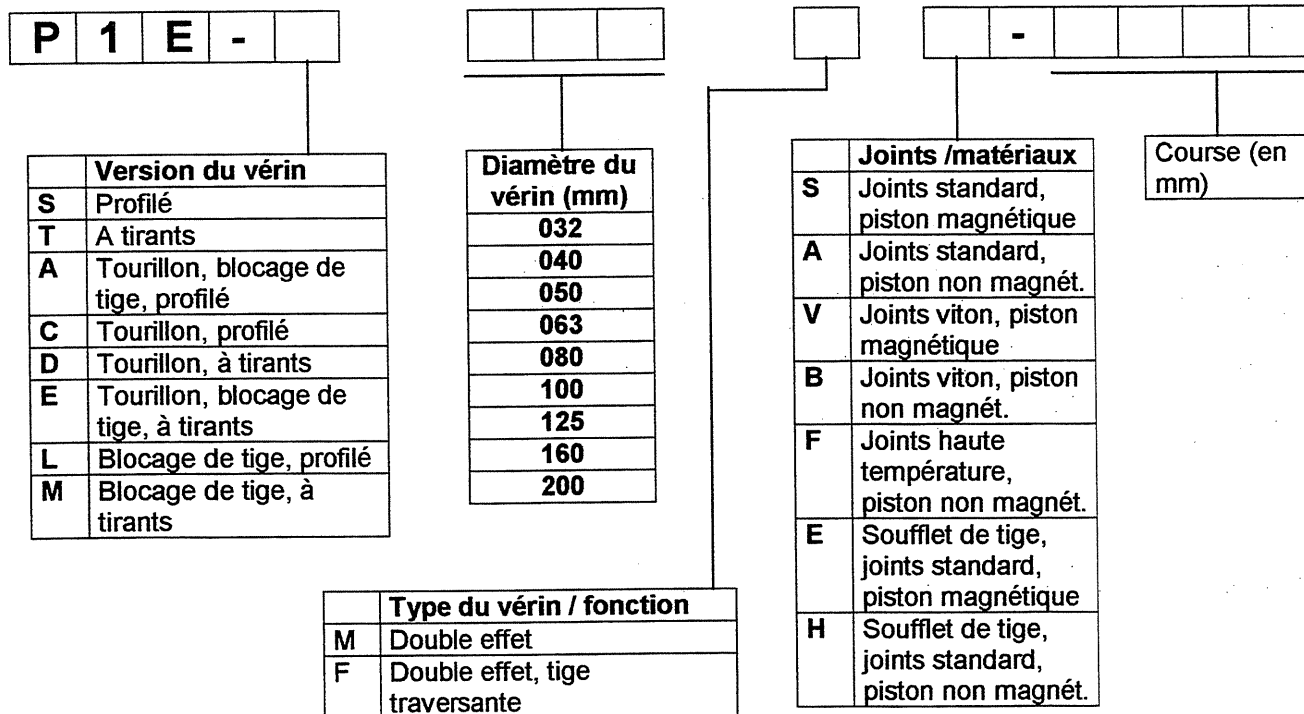
puissance normalisées des moteurs triphasés 50/60 Hz en catégorie AC-3					plage de réglage des déclencheurs thermiques	Courant de déclenchement magnétique Id +20%	Courant Ithe en coffret GV2-M...	commande par bouton poussoir	commande par bouton rotatif
220 V	400 V	440 V	500 V	690 V					
kW	kW	kW	kW	kW	A	A	A	référence	référence
					0,1 ...0,16	1,5	0,16	GV2-M01	GV2-P01
	0,06	0,06			0,16 ...0,25	2,4	0,25	GV2-M02	GV2-P02
0,06	0,09	0,09			0,25 ...0,40	5	0,40	GV2-M03	GV2-P03
	0,12	0,18		0,37	0,40 ...0,63	8	0,63	GV2-M04	GV2-P04
0,09	0,25	0,25	0,37	0,55	0,63 ...1	13	1	GV2-M05	GV2-P05
0,12	0,37	0,37							
0,18	0,37	0,37	0,37	0,75	1 ...1,6	22,5	1,6	GV2-M06	GV2-P06
0,25	0,55	0,55	0,55	1,1					
0,37	0,75	0,75	1,1	1,5	1,6 ...2,5	33,5	2,5	GV2-M07	GV2-P07
0,55	1,1	1,5	1,5	2,2	2,5 ...4	51	4	GV2-M08	GV2-P08
0,75	1,5		2,2	3					
1,1	2,2	2,2	4	4...6,3	4 ...6,3	78	6,3	GV2-M10	GV2-P10
		3							
1,5	3	4	5,5	6...10	6 ...10	138	9	GV2-M14	GV2-P14
2,2	4		7,5						
2,2	5,5	5,5	9	9...14	9 ...14	170	13	GV2-M16	GV2-P16
3		7,5	11						
4	7,5	7,5	15	13...18	13 ...18	223	17	GV2-M20	GV2-P20
		9							
5,5	9	11	18,5	17...23	17 ...23	327	21	GV2-M21	GV2-P21
	11								
5,5	11	11	22	20...25	20 ...25	327	23	GV2-M22	GV2-P22
7,5	15	15	22	24...32	24 ...32	416	24	GV2-M32	

## Annexe A2

(Disjoncteurs magnéto-thermiques (document constructeur))

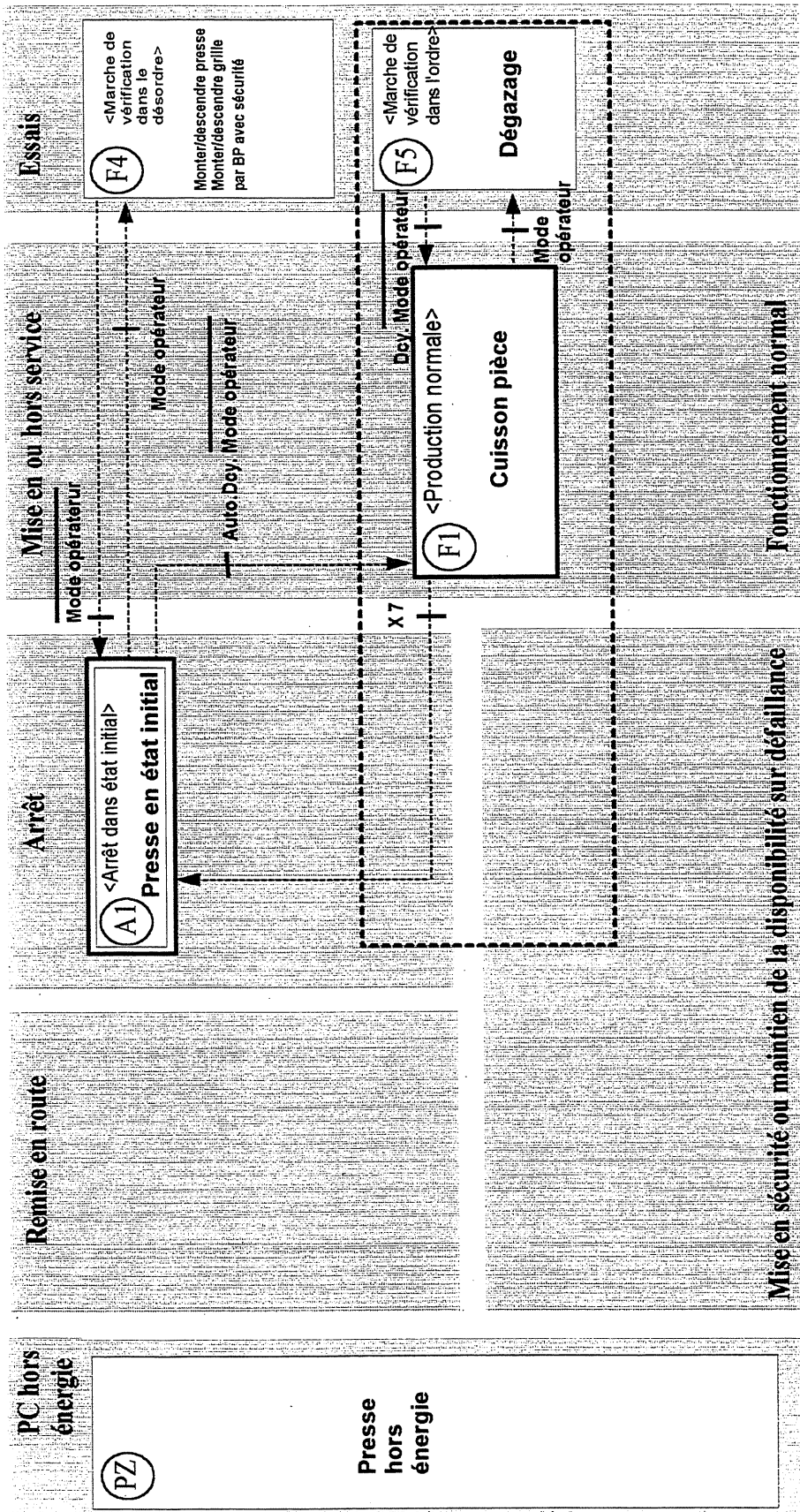
Vérins standard	Série P1E								
									
Diamètre du vérin (mm)	32	40	50	63	80	100	125	160	200
Diamètre de tige	12	16	20	20	25	25	32	40	40
Orifice de raccordement	G1/8	G1/4	G1/4	G3/8	G3/8	G1/2	G1/2	G3/4	G3/4
Course maxi (mm)	2800	2800	2800	2800	2800	2800	2800	2800	2800
Double effet	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Profilé	•	•	•	•	•	•			
A tirants	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Tige traversante	•	•	•	•	•	•	•	•	
Unité de blocage	•	•	•	•	•	•	•		
Unité de guidage	•	•	•	•	•	•			

Composition de la référence de commande :



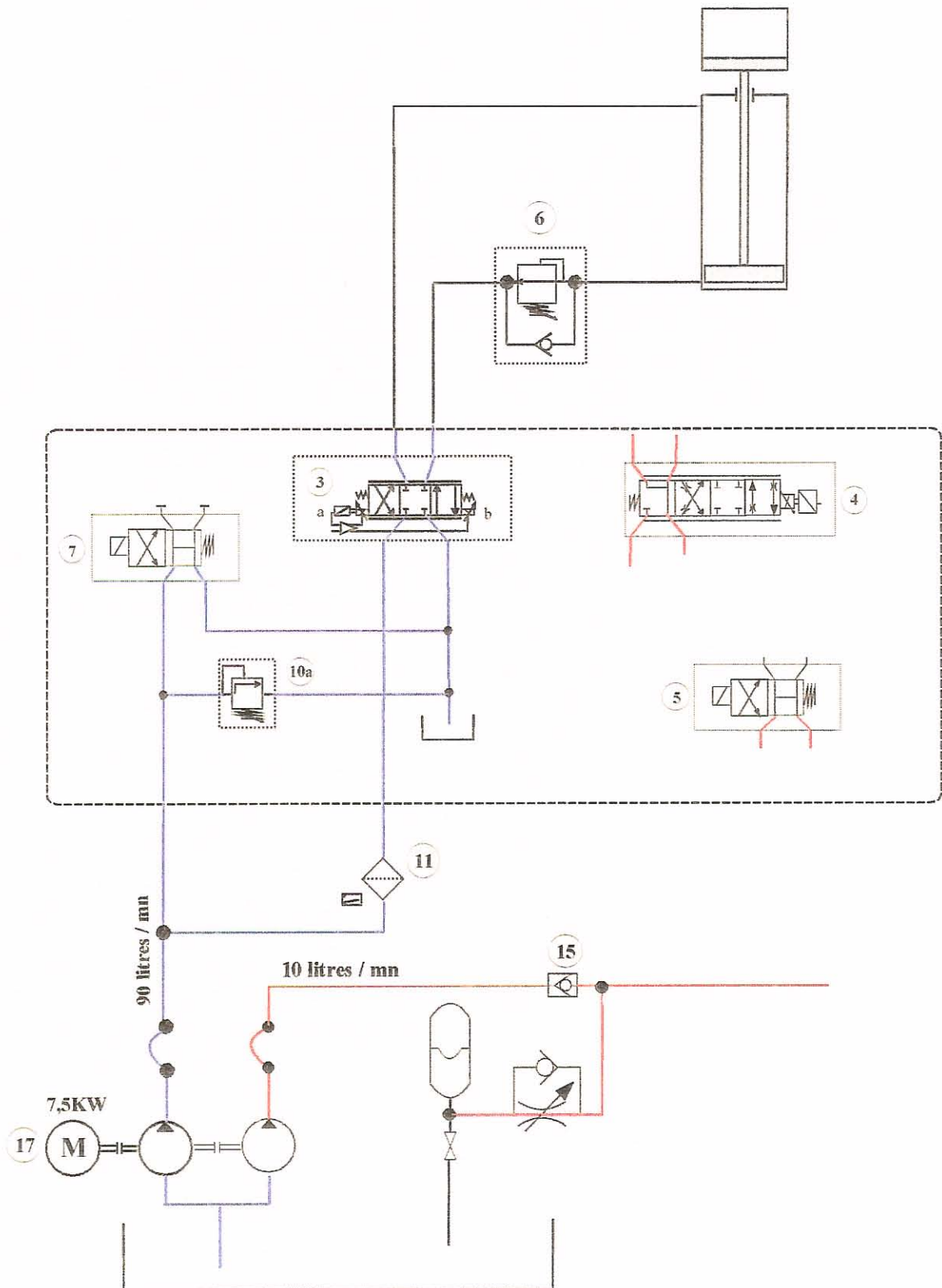
### Annexe A3

(Caractéristiques vérins (document constructeur))

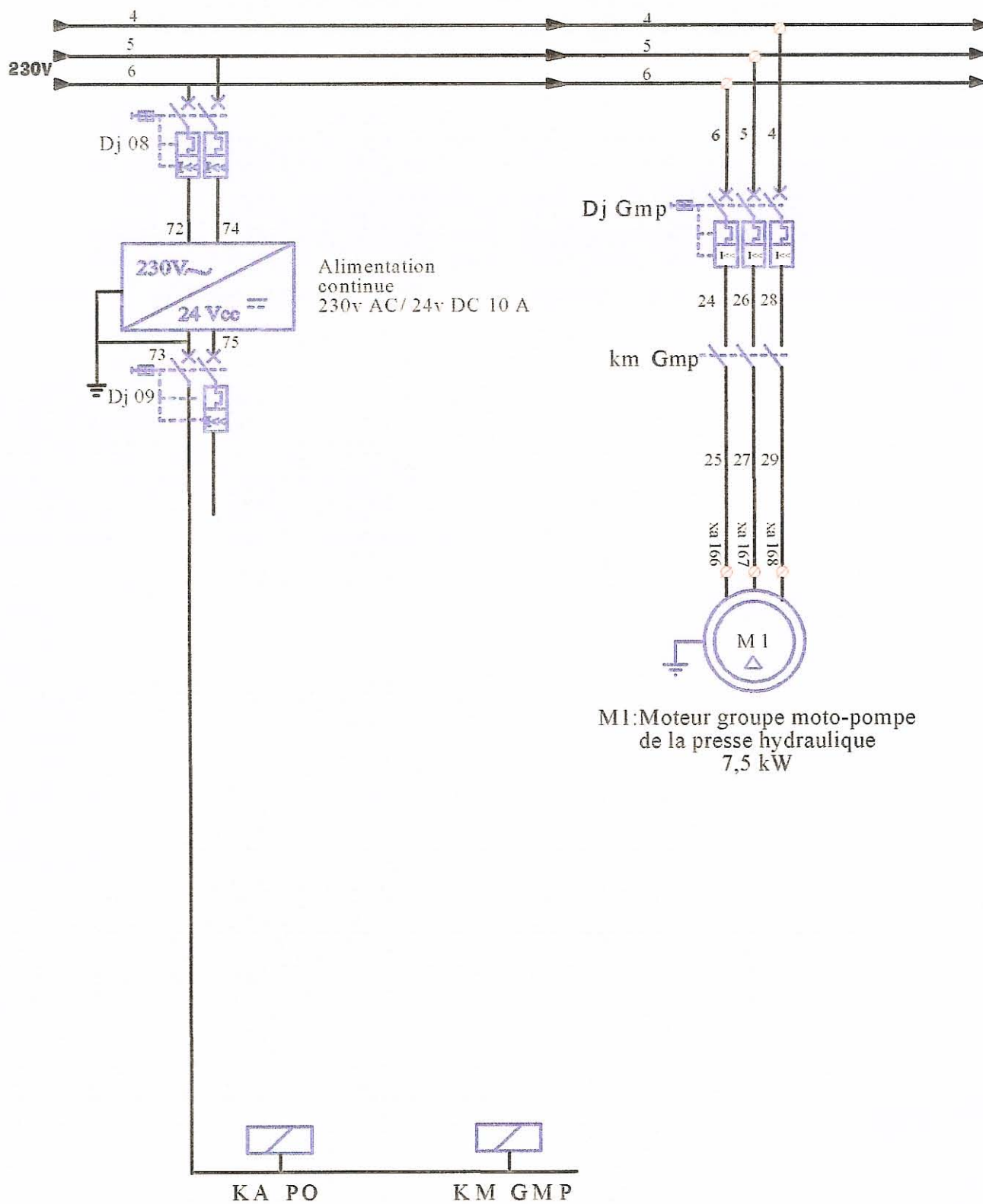


Annexe A4  
(GEMMA partiel)

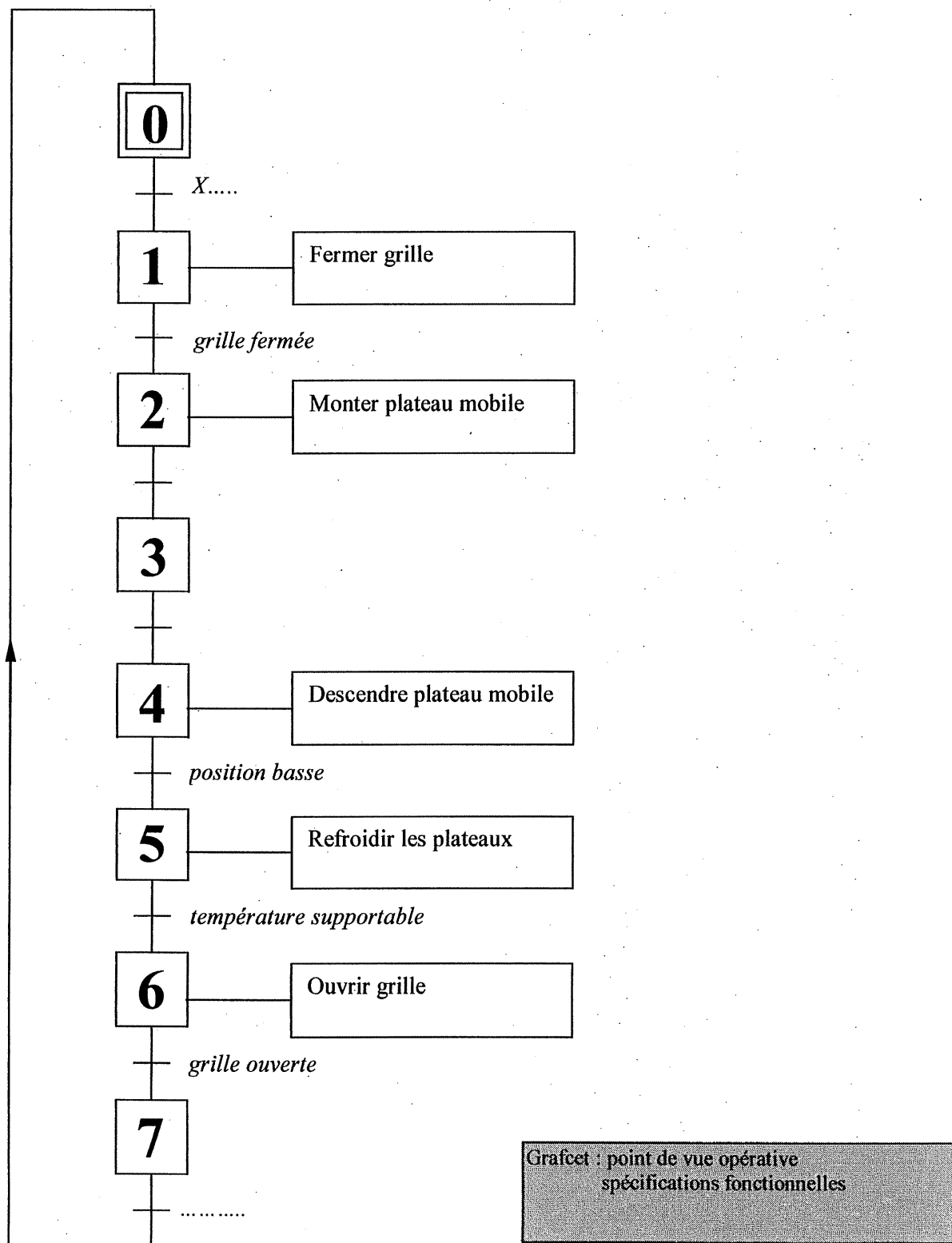
## Document réponse A-R1 : circuit hydraulique



Document réponse A-R2 : schéma électrique



## Document réponse A-R3 : grafcet GPN





**PARTIE B**

## PARTIE B

### (Etude de la mise en température du moule de pales de compresseur)

La constitution des deux plateaux (l'un fixe et l'autre mobile) est identique. Sur le plateau support sont disposés dans l'ordre : un isolant thermique, un plateau chauffant / refroidissant puis le plateau de bridage. L'ensemble du "sandwich" est entouré d'un isolant et le tout est carterisé. Le demi-moule est bridé sur le plateau de bridage (voir figure B1).

Les constituants technologiques composant la chaîne de régulation de température de la pièce en composite sont :

- un ensemble de 2 fois 3 x 3 cartouches résistances électriques ;
- un ensemble de 2 fois 3 relais statiques : préactionneurs permettant de distribuer l'énergie électrique aux cartouches résistances ;
- un ensemble de 2 fois 3 thermocouples permettant de délivrer à la commande une image de la température ;

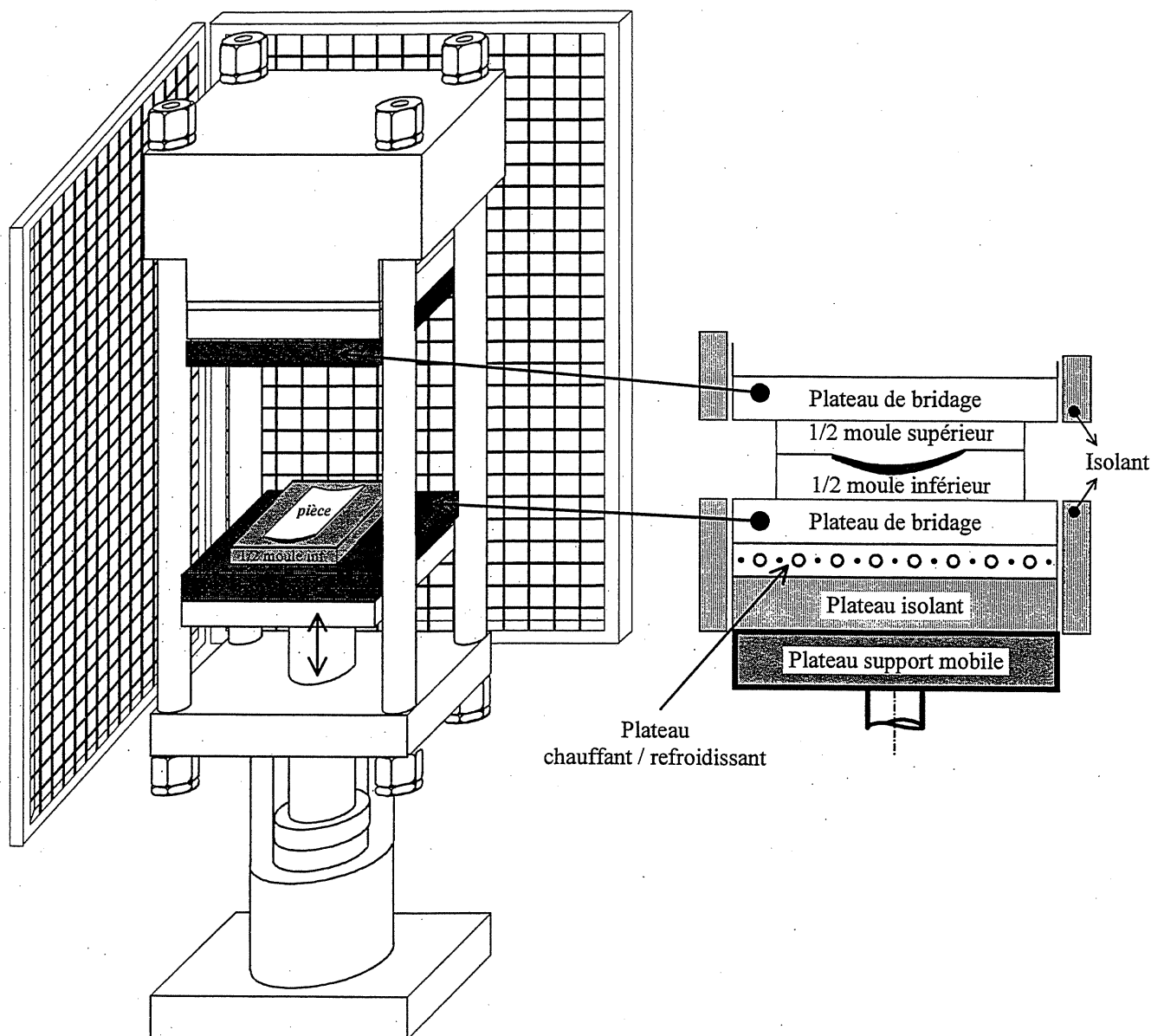


FIG. B1 : Schéma de principe des plateaux chauffants

Tournez la page S.V.P.

### Sous-partie B1 : Détermination de la puissance de chauffe

Le concepteur de la presse a choisi d'assurer la mise en température de chaque plateau par trois ensembles de trois résistances montées en triangle. La puissance dissipée de chaque résistance est de 1200 W lorsqu'elles sont alimentées avec la tension nominale entre phases, soit  $U=230$  v.

L'annexe B1 montre le schéma électrique partiel correspondant aux trois zones du plateau inférieur.

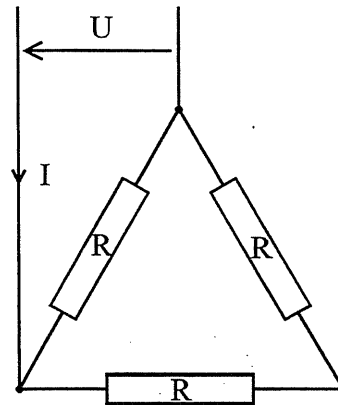


FIG. B2 : Montage des résistances chauffantes en triangle

#### Question B1-1 :

Calculer la puissance absorbée par effet joule de chaque ensemble. En déduire l'intensité efficace  $I$  circulant dans le câble d'alimentation.

#### Question B1-2 :

Calculer la puissance absorbée par effet joule de chaque ensemble dans le cas où les résistances sont câblées en étoile, la tension entre phases restant inchangée.

### Sous-partie B2 : Modélisation du processus de mise en température

La dissipation de l'énergie calorifique de chaque ensemble plateau, apportée par les cartouches résistants, est liée aux trois mécanismes de la transmission de chaleur suivant :

- La conduction thermique : le flux de chaleur se dirigeant des résistances (zones chaudes) vers les demi-moules (zones froides). C'est la loi de Fourier qui régit le phénomène :

$$d\Phi = -\lambda \operatorname{grad}(\Theta) d\bar{S}$$

- $d\Phi$  : flux de chaleur transféré à travers la surface orientée  $d\bar{S}$
- $\operatorname{grad}(\Theta)$  : gradient de température à la surface  $d\bar{S}$
- $\lambda$  : conductivité thermique du matériau (watt par mètre-kelvin,  $W/(m.deg)$ )

- la convection : au contact du moule (dans ce cas le corps chaud), l'air se met en mouvement et le refroidit. Les lois de convection sont d'une grande complexité. Le flux thermique échangé est défini par la loi de Newton :

$$\Phi = hS(\Theta - \Theta_a)$$

- $\Theta$  : température de la paroi du moule
- $\Theta_a$  : température ambiante (loin du moule)
- $S$  : surface d'échange thermique
- $h$  : coefficient de convection

- le rayonnement : émission d'ondes électromagnétiques du moule (le corps chaud) vers un corps froid (transmission fortement non linéaire, aussi nous n'y ferons pas référence dans la suite du sujet).

L'objectif de la sous-partie B2 est d'élaborer un modèle de connaissance simple du processus, utilisable ensuite dans une étude de régulation thermique.

Dans le cadre de ce sujet, et pour des raisons de complexité de traitement des équations de la thermique, nous avons choisi d'analyser le comportement de ce processus thermique par analogie électrique. Dans une première approche, nous pouvons considérer que le système est unidirectionnel et linéaire (hypothèse forte permettant de se donner une idée de son comportement).

**Analogie :**

température  $\Theta$  (degré)  $\longleftrightarrow$  tension V  
flux thermique  $\phi$  (watt)  $\longleftrightarrow$  courant I

Nous pouvons ainsi définir une résistance thermique par conduction et une par convection pour chacun des éléments (plateau chauffant/refroidissant, plateau de bridage, demi-moule). Nous pouvons également définir une capacité thermique analogue à la capacité électrique.

$$R_{thcd} = \frac{\ell}{\lambda S} \text{ (en deg./W)} ; R_{thcv} = \frac{1}{hS} \text{ (en deg./W)} \text{ avec } \ell : \text{ épaisseur du matériau}$$

$$C_{th} = m c_p \text{ (en J/deg.) avec } m : \text{ masse et } c_p : \text{ capacité thermique (chaleur spécifique)}$$

La figure B3 présente le schéma électrique simplifié équivalent.

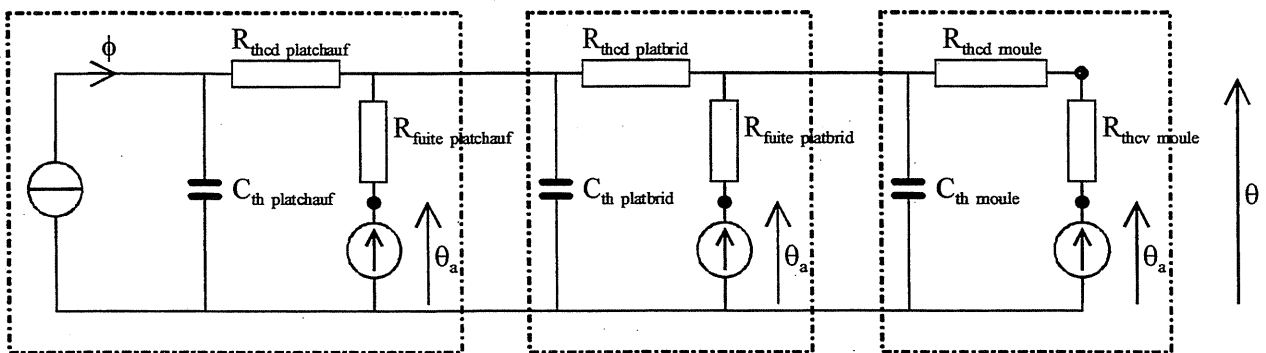


FIG. B3 : Schéma électrique équivalent

**Question B2-1 :**

*Interpréter le modèle électrique équivalent représenté à la figure 3.*

*Justifier l'utilisation de celui-ci pour modéliser le comportement thermique équivalent du processus.*

*Énoncer l'ensemble des hypothèses simplificatrices.*

En considérant que les plateaux sont parfaitement isolés (fuites négligeables) et que la résistance de contact entre chacun d'eux est nulle, nous pouvons établir un modèle approché plus global (voir figure B4).

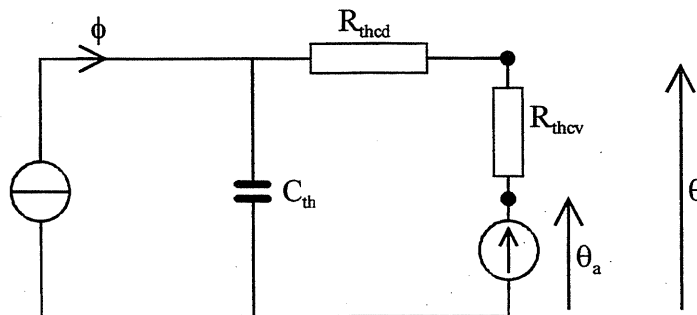


FIG. B4 : Schéma électrique équivalent global

Tournez la page S.V.P.

Nous pouvons alors définir une résistance thermique par conduction équivalente  $R_{thcd}$  et une capacité thermique équivalente  $C_{th}$  pour l'ensemble. Nous pouvons également définir une résistance par convection  $R_{thcv}$ .

**Question B2-2 :**

Exprimer la température du moule  $\Theta(s)$  en fonction des entrées  $\phi(s)$  et  $\Theta_a(s)$  :

$$\Theta(s) = H_1(s) \cdot \phi(s) + H_2(s) \cdot \Theta_a(s)$$

**Question B2-3 :**

Tracer la réponse indicielle de la température du moule  $\theta(t)$  lors d'une alimentation brutale et constante des cartouches résistances (flux  $\phi$ ).

Inscrire les informations caractéristiques sur cette courbe.

Juger de la validité de la réponse indicielle.

**Question B2-4 :**

On souhaite améliorer la représentativité du modèle. Pour cela, on considère les plateaux chauffant/refroidissant et de bridage comme un premier bloc métallique et le demi-moule comme un deuxième bloc métallique.

Les dimensions restent inchangées. Nous pouvons alors définir deux résistances thermiques par conduction ( $R_{thcd1}$  et  $R_{thcd2}$ ) et deux capacités thermiques ( $C_{th1}$  et  $C_{th2}$ ). La résistance thermique par convection ( $R_{thcv}$ ) restant inchangée.

Exprimer la température du moule  $\Theta(s)$  en fonction des entrées  $\phi(s)$  et  $\Theta_a(s)$  :

$$\Theta(s) = F_1(s) \cdot \phi(s) + F_2(s) \cdot \Theta_a(s)$$

Tracer la réponse indicielle de la température du moule  $\theta(t)$  lors d'une alimentation brutale et constante des cartouches résistances (flux  $\phi$ ).

Juger la validité de la réponse indicielle.

**Application numérique :**

<ul style="list-style-type: none"> <li>• section des plateaux et du moule : 400 x 450 mm</li> <li>• épaisseur plateau de bridage : 40 mm</li> <li>• épaisseur du demi-moule : 30 mm</li> <li>• épaisseur de la pièce en composite : négligeable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• matériaux des plateaux et du moule : acier</li> <li>• masse volumique de l'acier : 7800 kg/m<sup>3</sup></li> <li>• chaleur spécifique de l'acier : 0,11 Kcal/(kg.deg.)</li> <li>• conductivité thermique de l'acier : 54 W/(m.deg.)</li> <li>• 1 cal = 4,1855 J</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• flux thermique <math>\phi</math> : 10800 W par plateau chauffant</li> <li>• température ambiante <math>\theta_a</math> : 20 °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• résistance thermique par convection entre le demi-moule et l'air ambiant : 7,68 10<sup>-2</sup> deg./W</li> <li>• résistance thermique équivalente par conduction du plateau chauffant/refroidissant : 1,54 10<sup>-3</sup> deg./W</li> <li>• capacité thermique équivalente du plateau chauffant/refroidissant : 19392 J/deg.</li> </ul>

**Sous-partie B3 : Etude de la régulation de température**

Un automate programmable industriel assure la conduite des automatismes continus et séquentiels du processus. La figure B5 présente le schéma technologique de principe assurant la régulation en température d'un plateau. Le PID numérique utilise l'information délivrée par la carte d'entrées analogiques AEM adaptée au thermocouple (compensation soudure froide, ...). Le bloc fonction SCLF permet de travailler en échelle physique, en convertissant les données du coupleur.

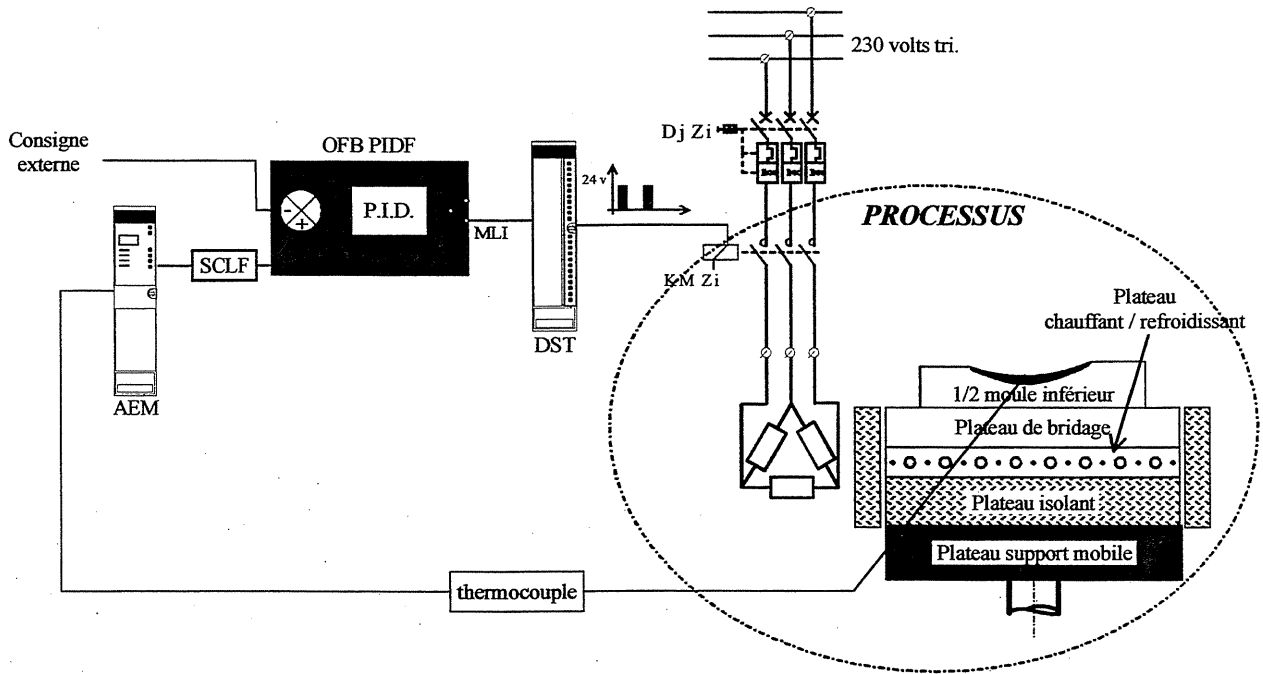


FIG. B5 : Schéma de principe de régulation des plateaux chauffants

La recherche d'un modèle de comportement du processus, le plus proche possible de la réalité, est nécessaire afin d'envisager la stratégie de commande la plus appropriée. La démarche classique consiste à rechercher ce modèle à partir de relevés expérimentaux (réponse indicielle).

La méthode d'expérimentation consiste à forcer les sorties tout ou rien (relais statiques) à l'état 1. Nous pouvons alors considérer que le réglage  $u_r$  est de 100 %. La tension aux bornes des résistances électriques est dans ce cas de 230 volts. Lors de ces essais, les deux parties de moule sont fermées et l'alimentation électrique des deux plateaux est simultanée.

Une sonde thermique est placée dans la pièce afin de relever la grandeur physique à maîtriser : la température.

L'ensemble (relais statiques + cartouches résistantes + plateaux + sondes) peut être modélisé, dans une première approche et en négligeant les perturbations, par un processus de type premier ordre avec retard, de fonction de transfert :

$$\text{PROC}(s) = \frac{\theta(s)}{u_r(s)} = \frac{K}{(1 + \tau s)} e^{-T_r s} \quad \text{avec} \quad K = 8,5^\circ\text{C} / \% \text{ de consigne} ; \tau = 6350\text{s} ; T_r = 236\text{s}$$

La figure B6 montre le schéma bloc fonctionnel équivalent retenu, dans le cadre de cette épreuve, de l'ensemble de régulation de température des plateaux.

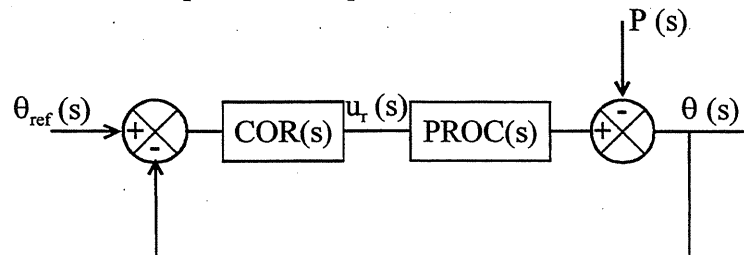


FIG. B6 : Schéma fonctionnel équivalent ( $u_r(s)$  exprimé en %)



### B31 Analyse fréquentielle

On ne considère que l'étude de l'asservissement en poursuite (P(s) n'est pas pris en compte).

Le respect des caractéristiques mécaniques des pièces nécessite une cuisson des tissus époxy, utilisés pour la fabrication de ces pièces, de 3 heures à la température de  $180 \pm 5$  °C.

Le correcteur utilisé est à action proportionnelle de fonction de transfert :  $COR(s) = k_p$ .

#### Question B31-1 :

*Esquisser le lieu de Nyquist.*

#### Question B31-2 :

*Donner l'expression du gain  $k_p$  en fonction de  $\tau$ ,  $T_r$  et  $K$  pour que le processus soit toujours stable. On utilisera le critère du Revers et dans le développement du calcul, on effectuera des simplifications sachant que  $\tau \gg T_r$ .*

#### Question B31-3 :

*Calculer la valeur minimale du gain  $k_p$  permettant de respecter l'erreur permanente autorisée sur la température, lorsque la consigne est constante.*

### B32 Analyse par lieu des pôles

L'inconvénient du retard dans un processus réside dans son aspect non linéaire et déstabilisant. L'utilisation de l'approximation de Padé permet de pallier cette non linéarité tout en conservant son caractère déstabilisant. Ce retard, selon l'approximation de Padé, est représenté sous la forme d'une constellation de pôles stables et de zéros instables dans sa forme générale. Les fonctions de Padé d'ordre 1 et 2 ont pour expression :

$$e^{(-T_r \cdot s)} \approx \frac{1 - \frac{T_r}{2}s}{1 + \frac{T_r}{2}s} \quad (\text{ordre 1}) ; \quad e^{(-T_r \cdot s)} \approx \frac{1 - \frac{T_r}{2}s + \frac{T_r^2}{12}s^2}{1 + \frac{T_r}{2}s + \frac{T_r^2}{12}s^2} \quad (\text{ordre 2})$$

#### Question B32-1 :

*Discuter de la validité de l'approximation du retard selon Padé en vous appuyant sur les diagrammes d'amplitude et de phase pour justifier votre réponse.*

#### Question B32-2 :

*Montrer que, dans le cas de l'utilisation de l'approximation de Padé du 1er ordre, le polynôme caractéristique est un polynôme du deuxième degré d'expression :*

$$P_c(s) = (1 + k_p K) + \left[ (1 - k_p K) \frac{T_r}{2} + \tau \right] s + \tau \frac{T_r}{2} s^2$$

La figure B7 présente le lieu des racines du polynôme caractéristique lorsque le gain de boucle  $k_p$  évolue de zéro vers l'infini (lieu d'Evans).

#### Question B32-3 :

*Justifier l'allure de ce lieu.*

*Déterminer les coordonnées des différents points caractéristiques (points de départ et d'arrivée, points de séparation et de jonction, ...) ainsi que le gain  $k_p$  correspondant.*

*Déterminer les conditions de stabilité du processus en calculant les points d'intersection des branches du lieu avec l'axe des imaginaires.*

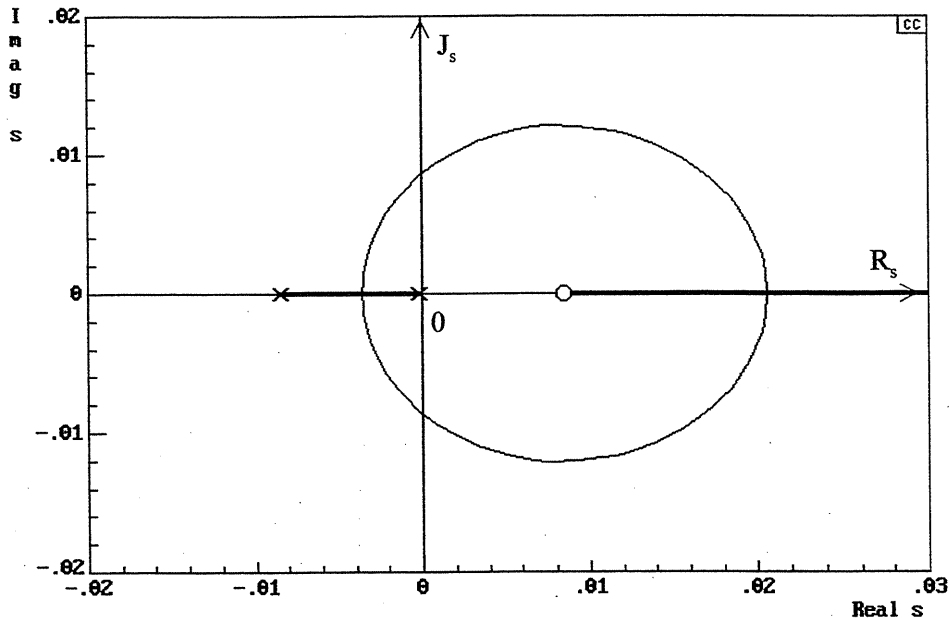


FIG. B7 : Lieu d'Evans de la boucle de température

**Question B32-4 :**

Déterminer les conditions de stabilité du processus en utilisant le critère de Routh.  
Comparer avec les résultats obtenus aux questions B32-3 et B31-3. Commenter et justifier les résultats obtenus.

**Question B32-5 :**

Donner l'expression du coefficient d'amortissement  $\zeta$  et de la pulsation naturelle  $\omega_n$ .  
Calculer leur valeur pour un gain  $k_p=4$ .  
Esquisser l'allure de la réponse indicielle. La période transitoire est-elle compatible avec les recommandations du fabricant. Commenter.

**Question B32-6 :**

Esquisser l'allure du lieu d'Evans dans le cas d'une approximation de Padé du 2ème ordre.

**B33 Synthèse d'un correcteur proportionnel intégral**

Le retard est approché par la formule de Padé limitée au 1er ordre de son développement. Le correcteur utilisé est maintenant à action proportionnelle et intégrale (PI) de fonction de transfert :

$$COR(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} \right)$$

**Question B33-1 :**

Donner la valeur de l'erreur permanente sur la température, lorsque la consigne est une constante et égale à 180 °C.

**Question B33-2 :**

Donner l'allure du lieu d'Evans sachant que la constante de temps intégrale  $\tau_i$  est choisie égale à  $\tau$ .  
Déterminer la valeur maximale du gain  $k_p$  dans le cas où l'utilisateur de la presse souhaite que la température des plateaux ne dépasse pas la consigne.  
Tracer, sur le lieu d'Evans, les racines du polynôme caractéristique en boucle fermée (une racine sera représentée par un "□").

Tournez la page S.V.P.

**Question B33-3 :**

Dans la plupart des cas, un concepteur de presse ne modélise pas ou n'identifie pas le processus de chauffe. Son expérience lui est alors très utile.

*Pour un gain  $k_p$  donné, expliquer les risques encourus lorsqu'une erreur de réglage sur la valeur du temps d'intégrale du correcteur a été commise par l'automaticien (applications numériques, prendre  $k_p=1$ ,  $\tau_i=63500$  s ou  $\tau_i=100$  s).*

*Justifiez votre réponse en esquissant le lieu d'Evans et la réponse indicielle dans les 2 cas.*

**Question B33-4 :**

Un des freins de l'utilisation des matériaux composites en production est le coût élevé de la fabrication des pièces (temps de cuisson important). La recherche, par les fournisseurs, de matériaux nouveaux a permis de descendre le temps de cuisson à quelques minutes, pour des caractéristiques mécaniques semblables.

*Proposer des solutions permettant de diminuer la constante de temps du processus thermique afin d'assurer la production désirée.*

Sous-partie B4 : Etude d'un régulateur industriel
---

***B41 Etude d'un régulateur industriel***

L'asservissement en température est assurée par un Automate Programmable Industriel disposant d'une bibliothèque de blocs fonctions de régulation (OFB) qui intègre les correcteurs nécessaires pour répondre aux besoins du process et les blocs de calcul et de mise en forme appropriés.

L'OFB **PIDF** permet de réaliser une boucle de régulation PID sur cet automate (voir figure B5). Il travaille à partir d'une mesure délivrée par un coupleur d'entrées analogiques et élabore une sortie qui peut être :

- soit analogique, appliquée au process par un module de sortie analogique,
- soit en modulation de durée, transmise au process par un module de sortie tout ou rien.

**Question B41-1 :**

*A partir des annexes B2 et B3, donner le schéma bloc minimal correspondant à l'application étudiée.*

*Donner la fonction des blocs conservés.*

***B42 Etude d'une solution de refroidissement***

La solution retenue pour assurer le refroidissement des plateaux, donc du moule et de la pièce, est une circulation :

- d'air lorsque la température est supérieure à 120 °C ;
- d'eau pulvérisée avec de l'air pour une température comprise entre 85 et 120 °C ;
- d'eau pour une température inférieure à 85 °C.

Seul le refroidissement par air est étudié dans le cadre de ce sujet.

Le plateau est traversé par huit tubes en cuivre montés avec un ajustement serré afin d'assurer une bonne conduction thermique. De l'air est distribué par le collecteur à des tubes perforés de trous de diamètre 1 mm. L'air sous pression souffle à l'intérieur du tube de taille plus importante et permet alors le refroidissement du plateau.

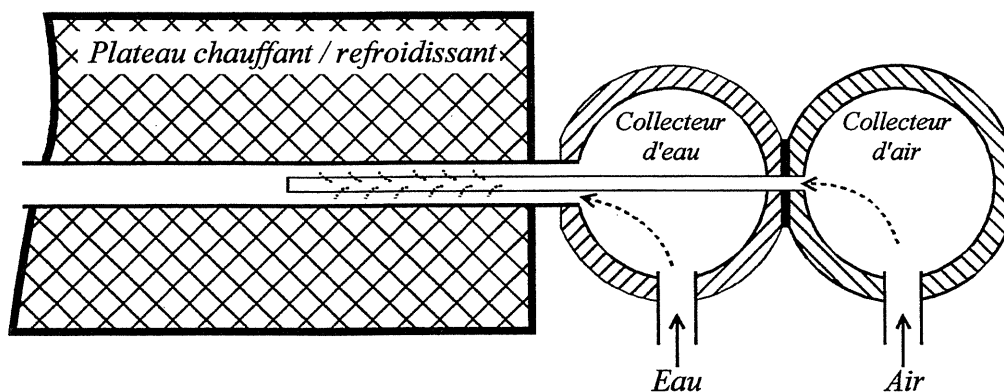


FIG. B8 : Schéma de principe du système de refroidissement des plateaux

**Question B42-1 :**

*Etablir le schéma pneumatique permettant d'assurer la régulation thermique des deux plateaux (phase de refroidissement par air).*

L'OFB *HCOOL* est un régulateur PID qui permet de réguler la température, contrôlée par l'intermédiaire de deux actionneurs antagonistes (un des actionneurs chauffe, l'autre refroidit). Cet OFB ne se différencie de l'OFB PIDF que par un étage de sortie qui délivre deux signaux analogiques et deux sorties en modulation de largeur d'impulsion, pour la commande des canaux chaud et froid.

Les deux actionneurs peuvent avoir :

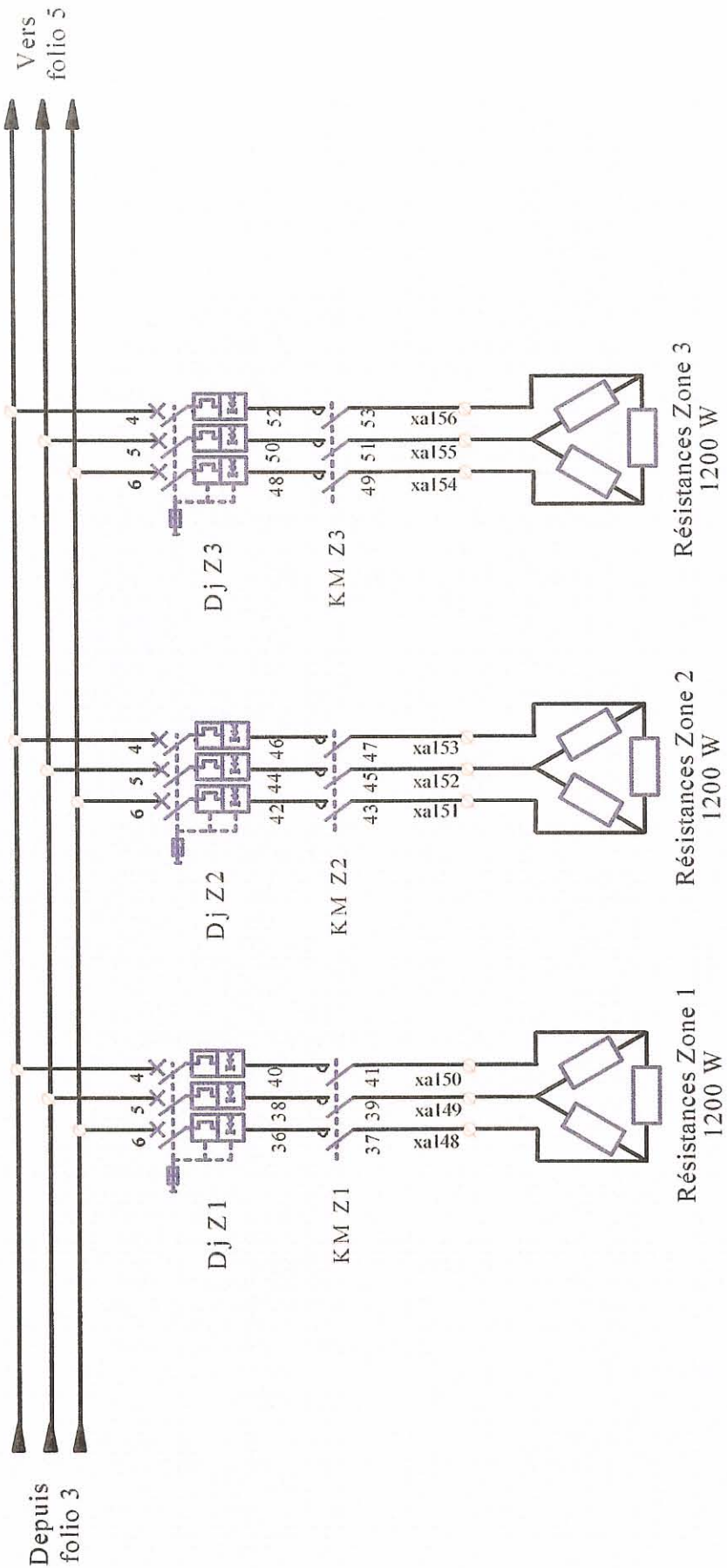
- un réglage d'action proportionnelle différent sur les sorties chaude et froide ;
- une zone morte ou une zone de recouvrement.

**Question B42-2 :**

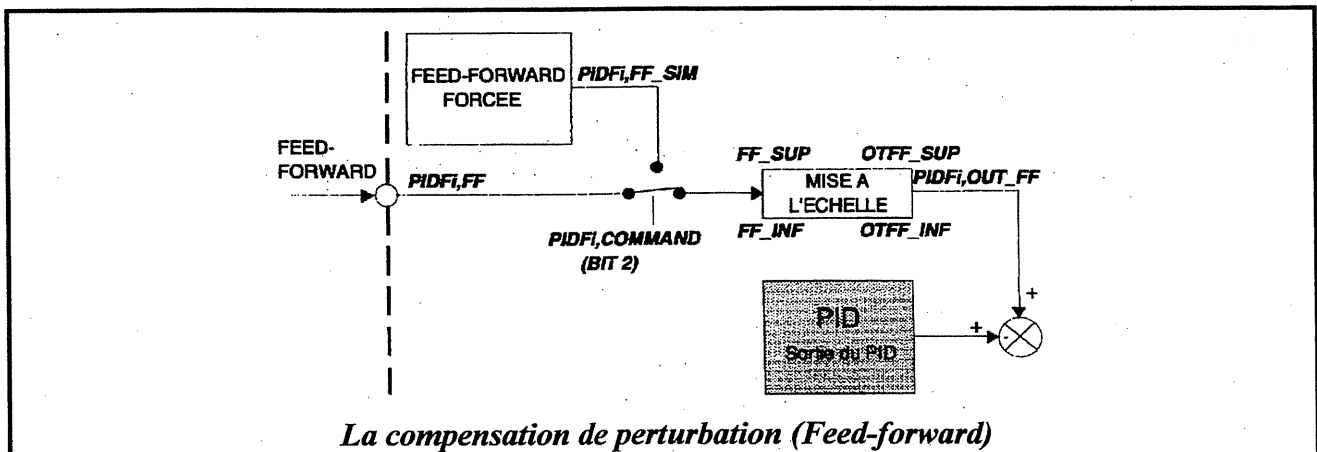
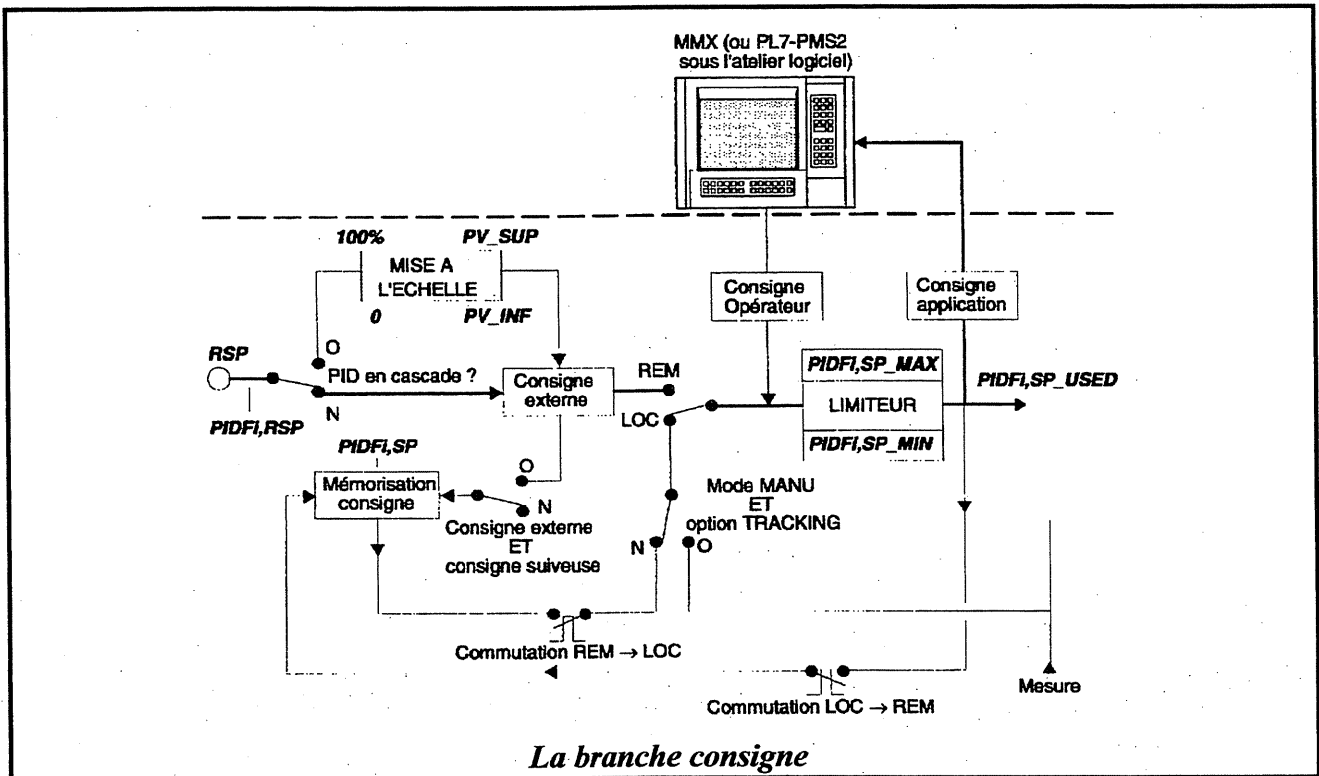
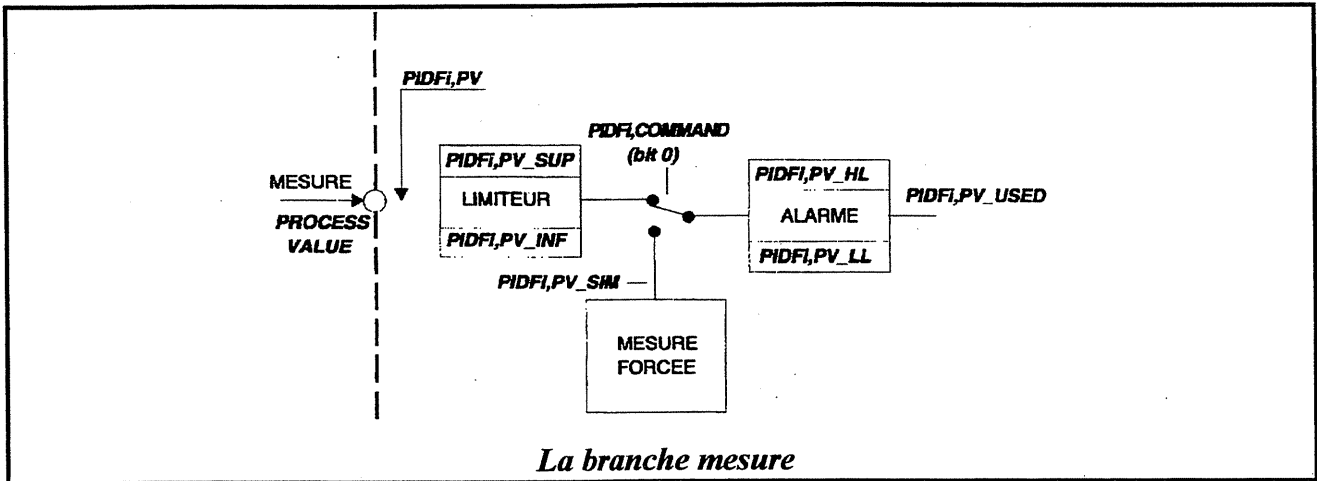
*A partir de l'annexe B4, établir le schéma bloc fonctionnel minimal permettant d'assurer la régulation thermique complète (chauffage et refroidissement).  
Commenter.*

**Remarque :**

La mauvaise qualité des schémas des annexes B2, B3, B4, ne gêne en rien la possibilité de répondre aux questions de cette sous-partie.

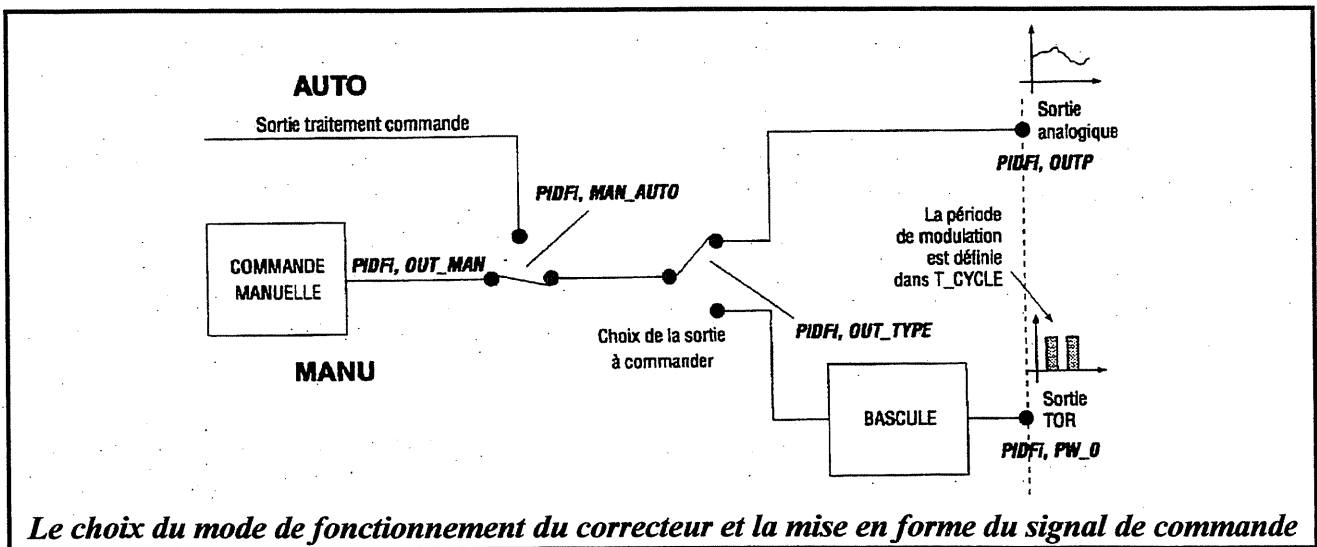
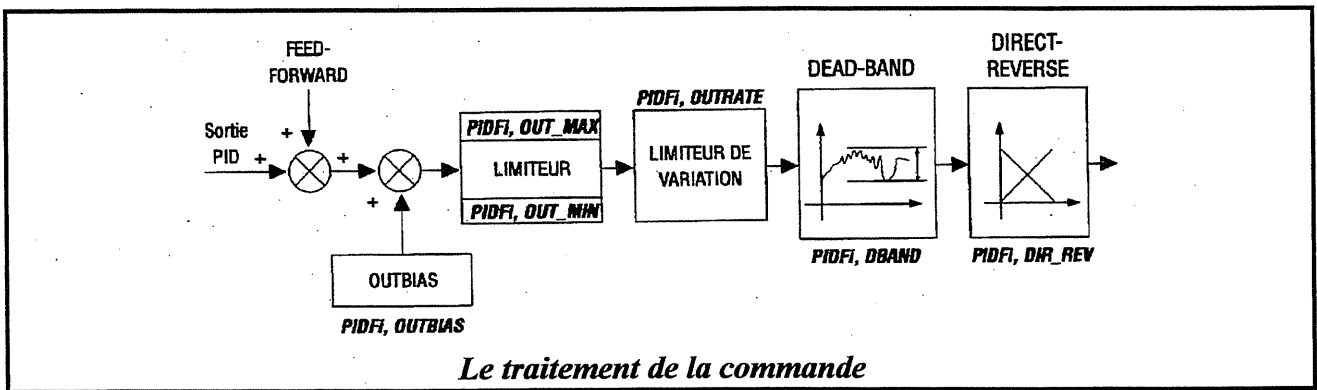
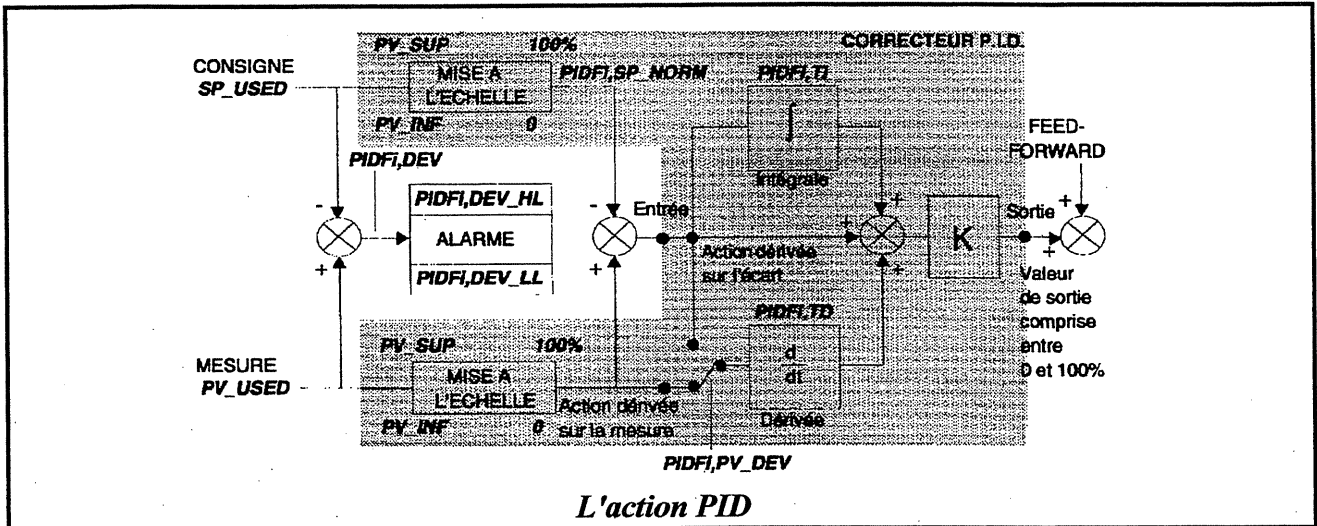


**Annexe B1**  
*(Schéma électrique partiel)*

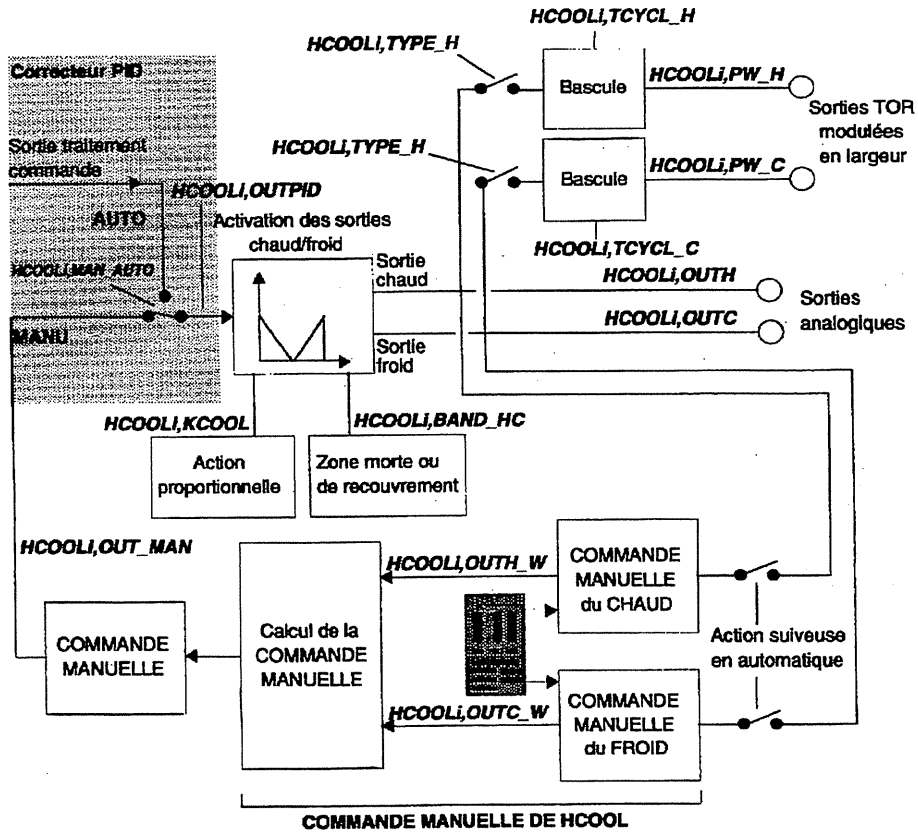


**Annexe B2**  
*(Description fonctionnelle de l'OFB PIDF)*





**Annexe B3**  
*(Description fonctionnelle de l'OFB PIDF)*



**Annexe B4**  
*(Description fonctionnelle de l'OFB HCOOL)*