

Groupe d'exploitation hydraulique (d'après CCP2000 PSI)

Présentation

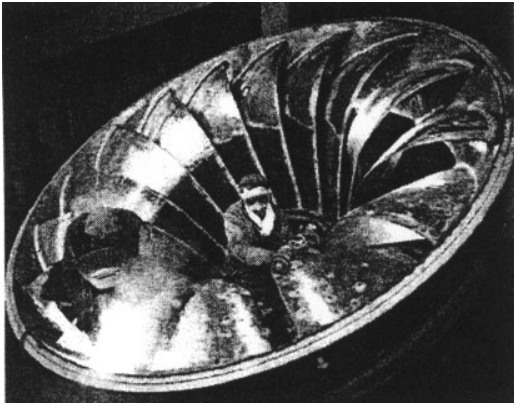
La production hydroélectrique

En 1880, à Vizille, près de Grenoble, l'ingénieur français Aristide Bergès accouple une turbine mue par une chute d'eau à une génératrice : la première centrale hydraulique était née. En 1946, il y avait en France 300 centrales hydrauliques. EDF fut créée par la loi de nationalisation, et entreprit d'aménager systématiquement les sites susceptibles d'être équipés pour les besoins de la production d'électricité, mais aussi pour ceux de la navigation et de l'irrigation. En 1962 la production hydraulique représente 50% de la production totale française, contre 15% actuellement. Mais l'hydraulique possède un atout de taille : l'eau est une source renouvelable et stockable. C'est une énergie rapidement mobilisable : en quelques minutes, les plus grands barrages peuvent fournir 14000 MW sur les 23000 MW du parc hydraulique.

À Serre-Ponçon



Figure 1 : Vue générale



Le barrage hydroélectrique de Serre-Ponçon est équipé de quatre turbines Francis dites « à réaction » : l'eau passant entre les aubes directrices de la turbine qui forment des conduits convergents, se trouve rabattue vers le centre de la roue et provoque un effet de réaction. Les quatre groupes d'exploitation hydraulique qui le constituent, sont pilotés soit localement, soit à distance par le centre de Sainte-Tulle, comme les 19 autres sites de production hydroélectrique de la Durance et du Verdon.

Le 25 janvier 1990, il y eût une tempête sur le nord-ouest de la France. Simultanément, quatre tranches nucléaires étaient arrêtées pour maintenance. Les ouvrages du gisement Durance-Verdon qui fournissaient au réseau 25 MW, durent faire face à une demande de 1330 MW. Puis ce fut le retour à une faible puissance.

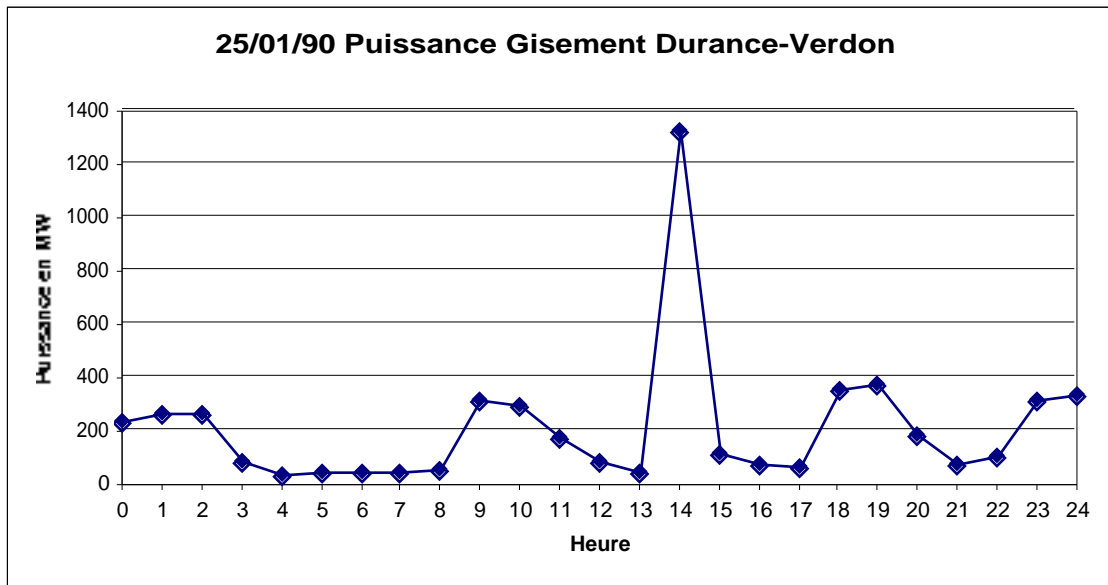


Figure 2 : Puissance fournie au réseau

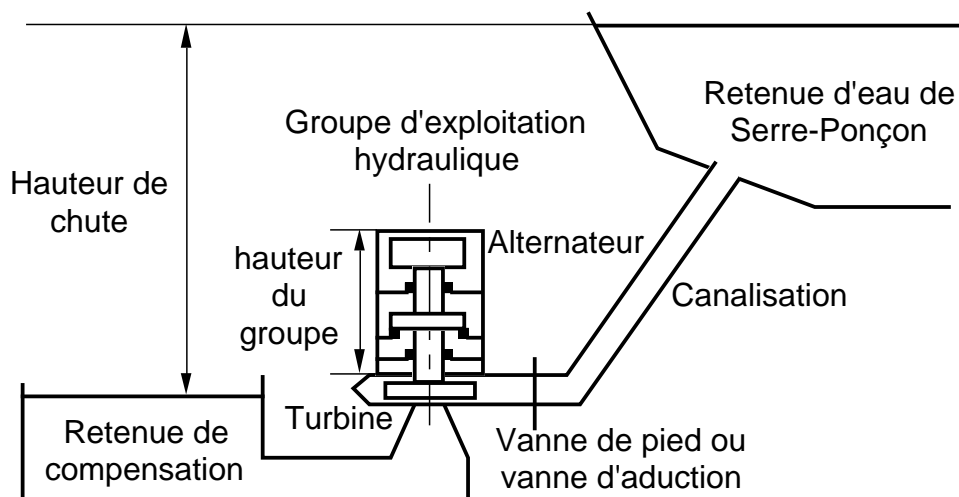


Figure 3 : Schéma des installations

La hauteur de chute d'eau est de 122 mètres. Le débit maximum utilisable est de 300 m³ par seconde et l'évacuateur de crue peut débiter jusqu'à 3500 m³ par seconde. Quatre groupes sont installés. Pour un groupe, l'ensemble tournant arbre, turbine et alternateur, mesure 14 m de haut pour un poids de 300 tonnes. La puissance fournie par un groupe peut atteindre 360 MW, alors que la production moyenne est de 720 GWh.

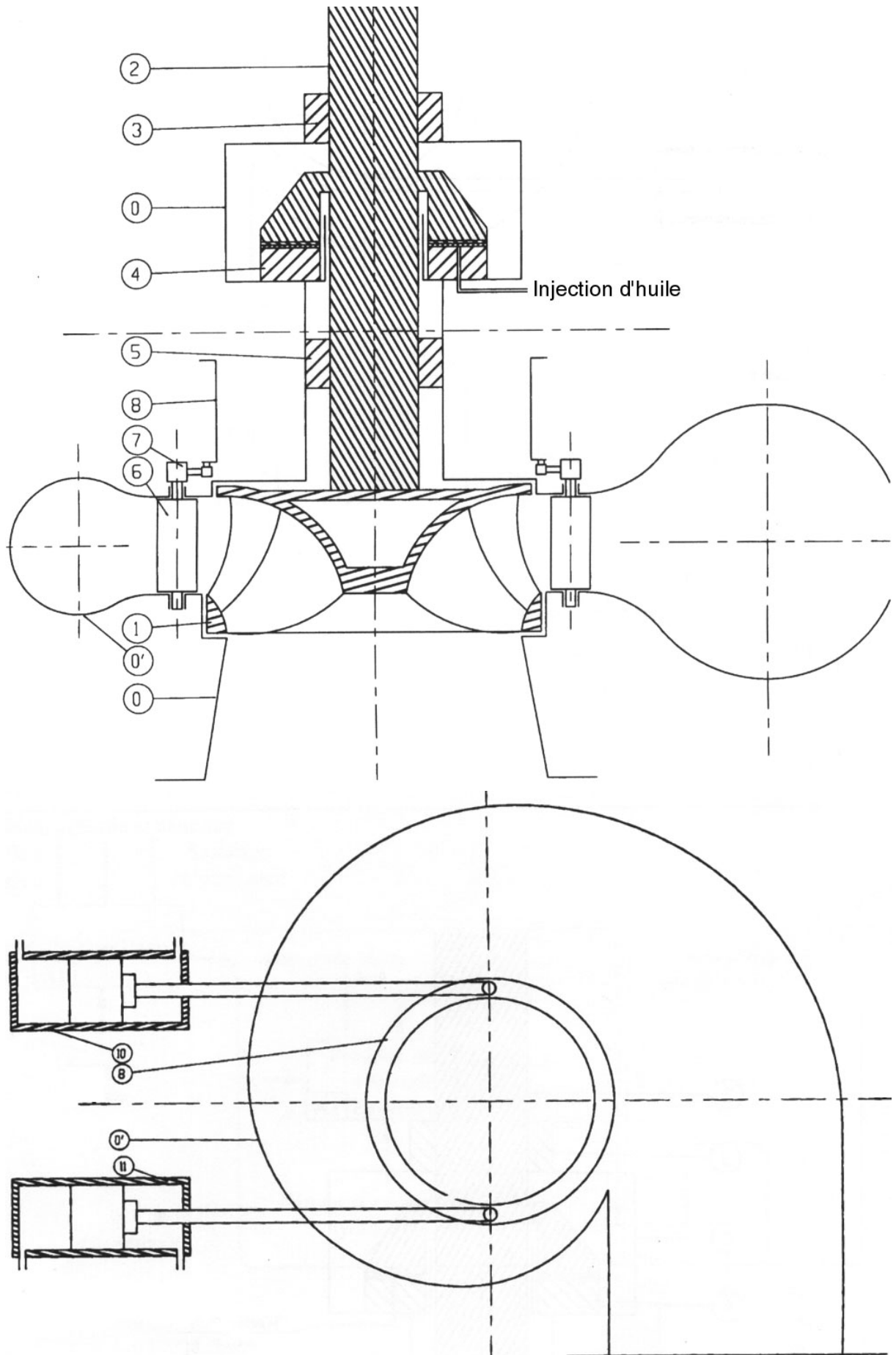


Figure 4 : Plan général

Ce groupe est constitué de :

- Une turbine Francis 1 qui transforme l'énergie hydraulique en énergie mécanique.
- Un alternateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Un arbre 2 qui transmet cette énergie mécanique de la turbine vers l'alternateur.
- Une tuyère qui canalise le flux d'eau amont.
- 27 pales 6 qui orientent ce flux sur les aubes de la turbine suivant différentes incidences.
- Une vanne de pied qui régule le débit d'eau dans la tuyère.
- Un régulateur de fréquence qui, à partir des données comme la fréquence de rotation en sortie du groupe, la position des pales et la consigne de fréquence génère la consigne d'orientation des pales.
- Un régulateur de tension qui permet d'asservir la sortie en tension du groupe par une commande d'ouverture de la vanne de pied en fonction de sa position et de celle des pales, de la demande de puissance du client et de la puissance effectivement générée en sortie du groupe.

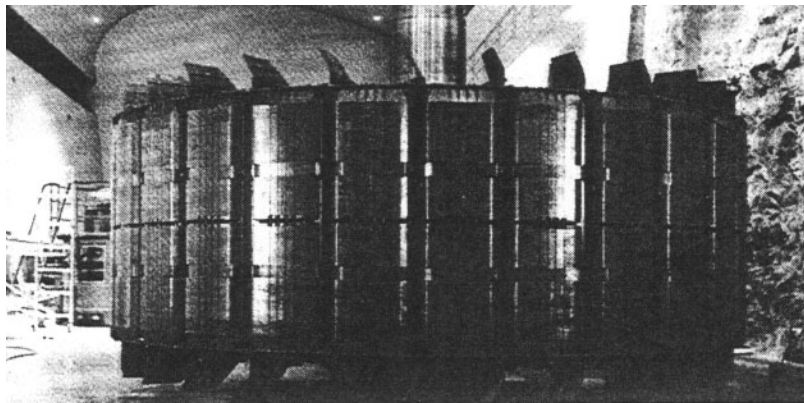


Figure 5 : Rotor d'alternateur

Notations

Un axe passant par un point P quelconque et de même direction qu'un vecteur unitaire \vec{u} est noté (P, \vec{u}) . Un axe de direction identique passant un point Q est noté (Q, \vec{u}) .

Les repères considérés sont tous orthonormés directs.

Le torseur associé aux actions mécaniques exercées par le solide i sur le solide j est précisé par ses éléments de réduction en un point P, en projection sur la base associée au repère $R\{O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z}\}$:

$$T(i/j) = \begin{cases} \vec{R}(i/j) \\ \vec{M}(P, i/j) \end{cases} = \begin{cases} X_{ij} \vec{x} + Y_{ij} \vec{y} + Z_{ij} \vec{z} \\ L_{ij} \vec{x} + M_{ij} \vec{y} + N_{ij} \vec{z} \end{cases}$$

De même, le torseur cinématique du mouvement du solide j par rapport au solide i est :

$$V(j/i) = \begin{cases} \vec{\Omega}(j/i) \\ \vec{V}(P, j/i) \end{cases} = \begin{cases} p_{ji} \vec{x} + q_{ji} \vec{y} + r_{ji} \vec{z} \\ u_{ji} \vec{x} + v_{ji} \vec{y} + w_{ji} \vec{z} \end{cases}$$

La masse du solide i est notée m_i . Le centre de masse du solide i est noté G_i .

L'accélération d'un point P, supposé appartenir au solide j, par rapport au repère i, est notée : $\vec{\Gamma}(P, j/i)$

La dérivée de la variable x par rapport au temps est notée : $\frac{dx}{dt} = \dot{x}$.

Les torseurs cinétique et dynamique d'un ensemble E, de masse m(E), en mouvement par rapport au repère R sont respectivement notés :

$$C(E/R) = \begin{cases} m(E) \vec{V}(G/R) \\ \underset{A}{\vec{\sigma}}(A,E/R) \end{cases} \quad D(E/R) = \begin{cases} m(E) \vec{\Gamma}(G/R) \\ \underset{A}{\vec{\delta}}(A,E/R) \end{cases}$$

L'énergie cinétique d'un solide i dans son mouvement par rapport à un repère j est notée: T(i/j).

On note F(p) la transformée de Laplace de la fonction f(t). Pour l'analyse harmonique, les pulsations sont notées ω (en rad/s).

La forme canonique de l'équation différentielle du second ordre est :

$$\ddot{y}(t) + \frac{2\xi}{\omega_0} \dot{y}(t) + y(t) = x(t)$$

Ces notations doivent être impérativement respectées dans tous les travaux remis.

Les unités employées doivent être celles du système international (SI).

A. Analyse fonctionnelle

A.1. Rôle et fonction des éléments d'un groupe

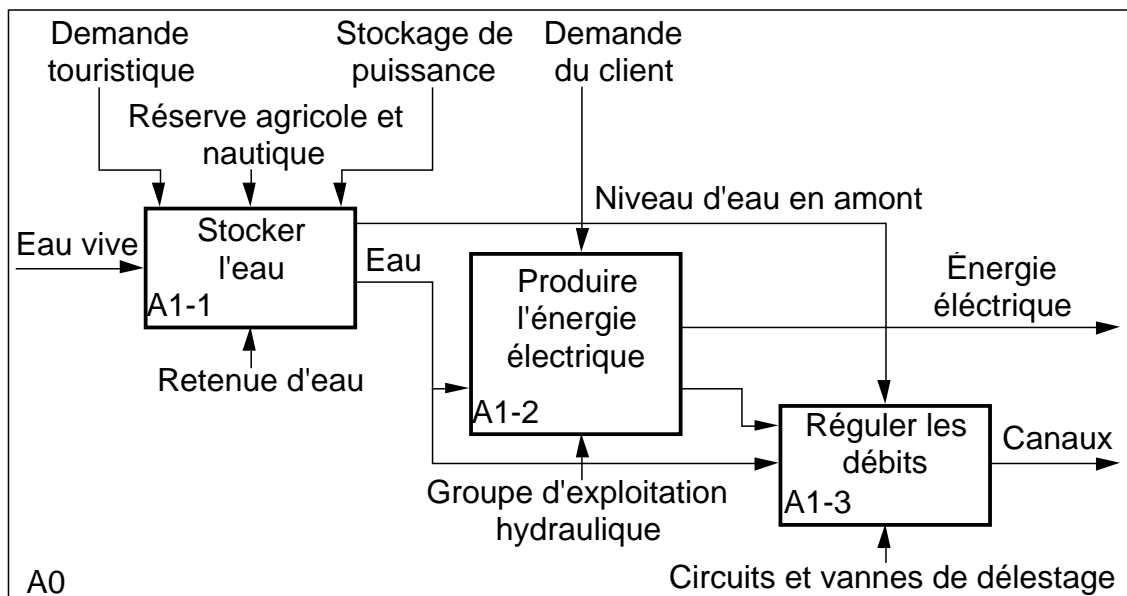


Figure 6 : Diagramme A0 relatif aux barrages et centrales hydrauliques

Le rôle du groupe est de fournir la puissance répondant à la demande du client avec une fréquence en tension de 50 Hz qui est la fréquence du réseau français.

B. L'ensemble de transmission de puissance

L'étude porte sur une partie du groupe d'exploitation hydraulique. À partir d'une modélisation simplifiée de l'ensemble de transmission de la puissance, on souhaite déterminer le temps de montée en vitesse de l'arbre de transmission, afin de déterminer l'instant de couplage de l'alternateur avec le réseau.

B.1. Modélisation

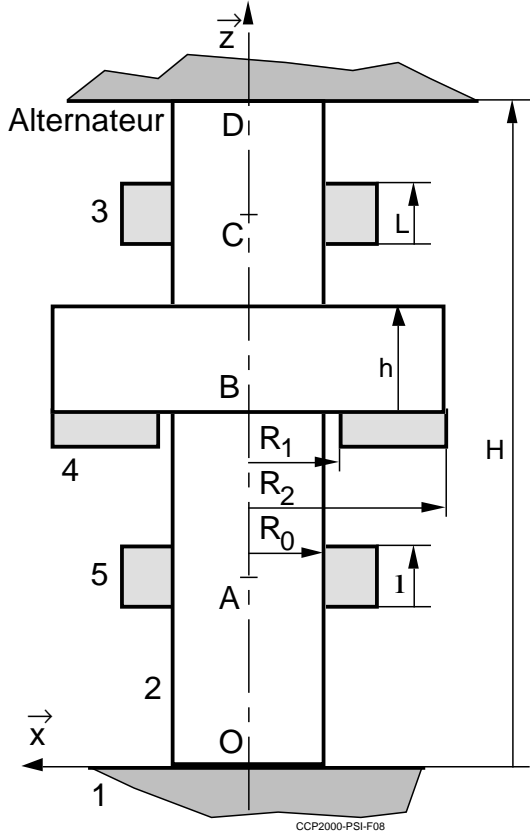


Figure 8 :Schéma

On note m la masse de l'ensemble tournant constitué de l'arbre, de la turbine et du rotor de l'alternateur, de centre de masse G .

Le repère $R\{O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z}\}$ est lié au bâti.

L'accélération de la pesanteur est :

$$\vec{g} = -g \vec{z}$$

On pose :

$$\vec{OA} = a \vec{z}$$

$$\vec{OB} = b \vec{z}$$

$$\vec{OC} = c \vec{z}$$

$$\vec{OD} = d \vec{z}$$

$$\vec{OG} = k \vec{z}$$

Le repère $R_2\{O, \vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}\}$ est lié à l'arbre de transmission et on pose :

$$\theta = (\vec{x}, \vec{x}_2)$$

B.2. Cinématique de l'arbre de transmission

B.2.1. Analyse des liaisons entre le bâti 0 et l'arbre de transmission 2

Le bâti 0 est en liaison complète démontable avec chacun des sous-ensembles 3, 4 et 5.

La nature du contact des liaisons 2-3 et 2-5 est considérée comme « cylindrique courte ».

Q2. Donner le nom du modèle retenu et le torseur cinématique associés à chacune des liaisons 2-3, 2-4 et 2-5.

B.2.2. Schéma cinématique

Q3. Tracer un schéma cinématique spatial représentant ces trois liaisons.

B.2.3. Graphe des liaisons entre le bâti 0 et l'arbre de transmission 2

Q4. Tracer le graphe des liaisons et déterminer le torseur cinématique de la liaison 0-2.

B.2.4. Hyperstatisme et mobilité de la liaison 0-2

Q5. Déterminer le degré d'hyperstatisme du montage bâti - arbre de transmission et donner le degré de mobilité cinématique de la liaison équivalente.

B.3. Étude statique de l'arbre de transmission

Pour cette partie, on suppose les liaisons parfaites et sans frottement.

B.3.1. L'arbre de transmission au repos

Au repos, le torseur d'action mécanique de l'alternateur sur l'arbre 2 est nul, ainsi que le torseur d'action mécanique de l'eau sur la turbine 1 en liaison complète avec l'arbre de transmission.

Q6. Appliquer le principe fondamental de la statique à l'arbre de transmission 2. Préciser les équations scalaires correspondantes, au point O, en projection sur R.

B.3.2. Actions de l'arbre 2 sur le plateau de pression 4

Q7. En déduire la pression de contact, supposée constante et notée p, entre 2 et 4, en fonction de R_1 , R_2 et m.

B.4. Mise en rotation de l'arbre de transmission

Lors de la mise en rotation de l'arbre de transmission, des pompes permettent de créer un film hydrodynamique entre 2 et 4 afin de diminuer les frottements le plus possible.

Soit f le facteur de frottement entre 2 et 4, et f_1 le facteur de frottement entre 2 et 3 et entre 2 et 5.

Durant la phase de mise en rotation, la tension de sortie de l'alternateur n'est pas couplé au réseau EDF. Les actions mécaniques de l'eau sur la turbine 1 et celles de l'alternateur sur l'arbre 2 sont modélisables par les torseurs :

$$T(\text{eau}/1) = \begin{cases} F_E \vec{z} \\ O \ C_E \vec{z} \end{cases} \quad T(\text{alternateur}/2) = \begin{cases} 0 \\ C_G \vec{z} \end{cases}$$

B.4.1. Frottements

Dans cette partie, les frottements ne sont pas négligés.

Q8. Caractériser les torseurs d'actions mécaniques associés à chacune des liaisons 2-3, 2-4 et 2-5.

Q9. Déterminer N_{42} en fonction de R_1 , R_2 , m, f et F_E .

B.5. Énergie cinétique de l'ensemble en rotation

B.5.1. Inerties

La matrice d'inertie en O de la turbine 1 et la matrice d'inertie en D de la partie mobile de l'alternateur en liaison complète avec l'arbre 2 sont :

$$J_{(O,1)} = \begin{pmatrix} A_1 & 0 & 0 \\ 0 & A_1 & 0 \\ 0 & 0 & C_1 \end{pmatrix}_{R_1} \quad J_{(D,Alt)} = \begin{pmatrix} A_2 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 0 \\ 0 & 0 & C_2 \end{pmatrix}_{R_2}$$

Q10. Déterminer le moment d'inertie C de l'arbre de transmission par rapport à l'axe (O, \vec{z}) en fonction des paramètres géométriques et de la masse volumique ρ . En déduire le moment d'inertie I_{Ozz} de l'ensemble en rotation par rapport à l'axe (O, \vec{z}) .

B.5.2. Énergie cinétique de l'ensemble en rotation

Q11. Déterminer l'énergie cinétique de l'ensemble en rotation dans son mouvement par rapport à R.

B.6. Aspect énergétique

Les frottements dans les liaisons 2-3 et 2-5 sont négligés. Les quantités C_E , C_G , et F_E , sont supposées constantes. À $t = 0$, on a : $\theta = 0$ et $\dot{\theta} = 0$.

B.6.1. Théorème de l'énergie cinétique

Q12. Quelle équation obtient-on en appliquant le théorème de l'énergie cinétique à l'ensemble en rotation dans son mouvement par rapport à R ?

Q13. En déduire l'expression du temps t_1 nécessaire pour atteindre la fréquence de rotation $\dot{\theta} = \dot{\theta}_1$ en fonction de N_{42} , C_E , C_G , et I_{Ozz} .

B.6.2. Énergie dissipée en chaleur

Q14. Déterminer le travail, entre les instants $t = 0$ et $t = t_1$, des actions mécaniques du plateau de pression 4 sur l'arbre de transmission 2 dans son mouvement par rapport à R.

C. Mise en route du groupe

Cette étude porte sur une partie du système automatisé de production, la procédure de démarrage du groupe, la gestion des pompes d'injection d'huile et l'arrêt d'urgence.

C.1. Procédure de démarrage

Une demande de mise en marche du groupe, en mode local quand la demande émane du barrage ou en mode à distance quand la demande émane du bureau régional, comporte trois phases.

- La première phase correspond à la procédure de montée en puissance du groupe.
- La seconde phase correspond au fonctionnement normal asservi en puissance et en fréquence.
- La troisième phase correspond à la procédure d'arrêt du groupe.

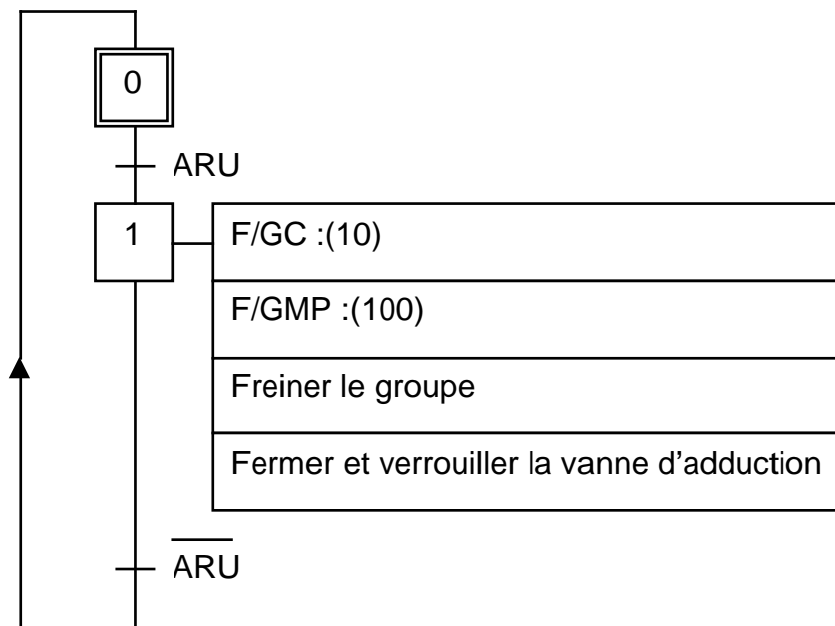


Figure 9 : Graphe de sécurité : GS

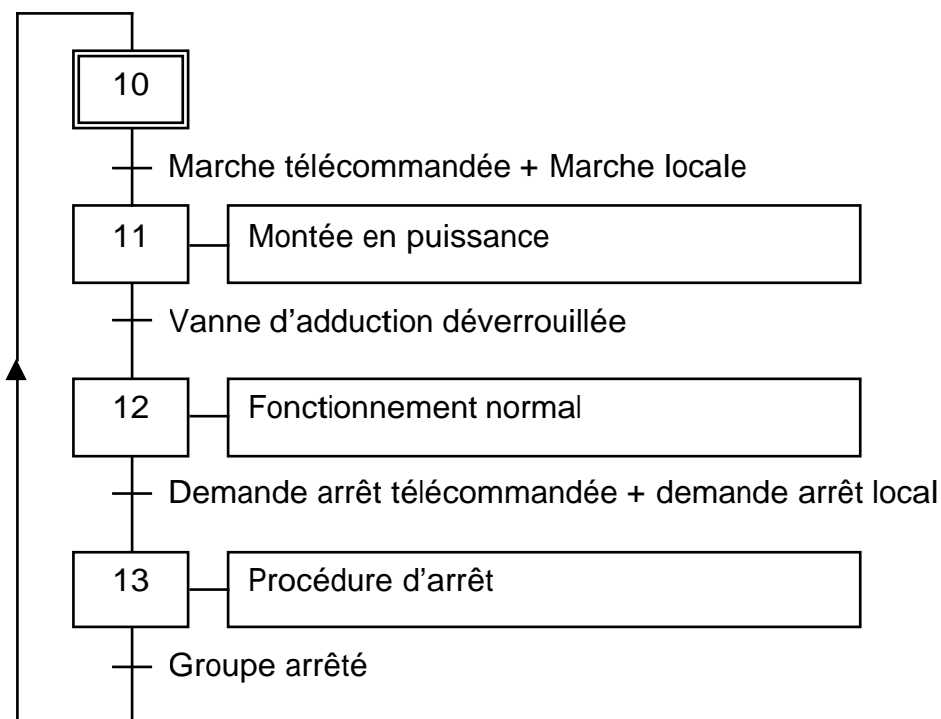


Figure 10 : Graphe de conduite : GC

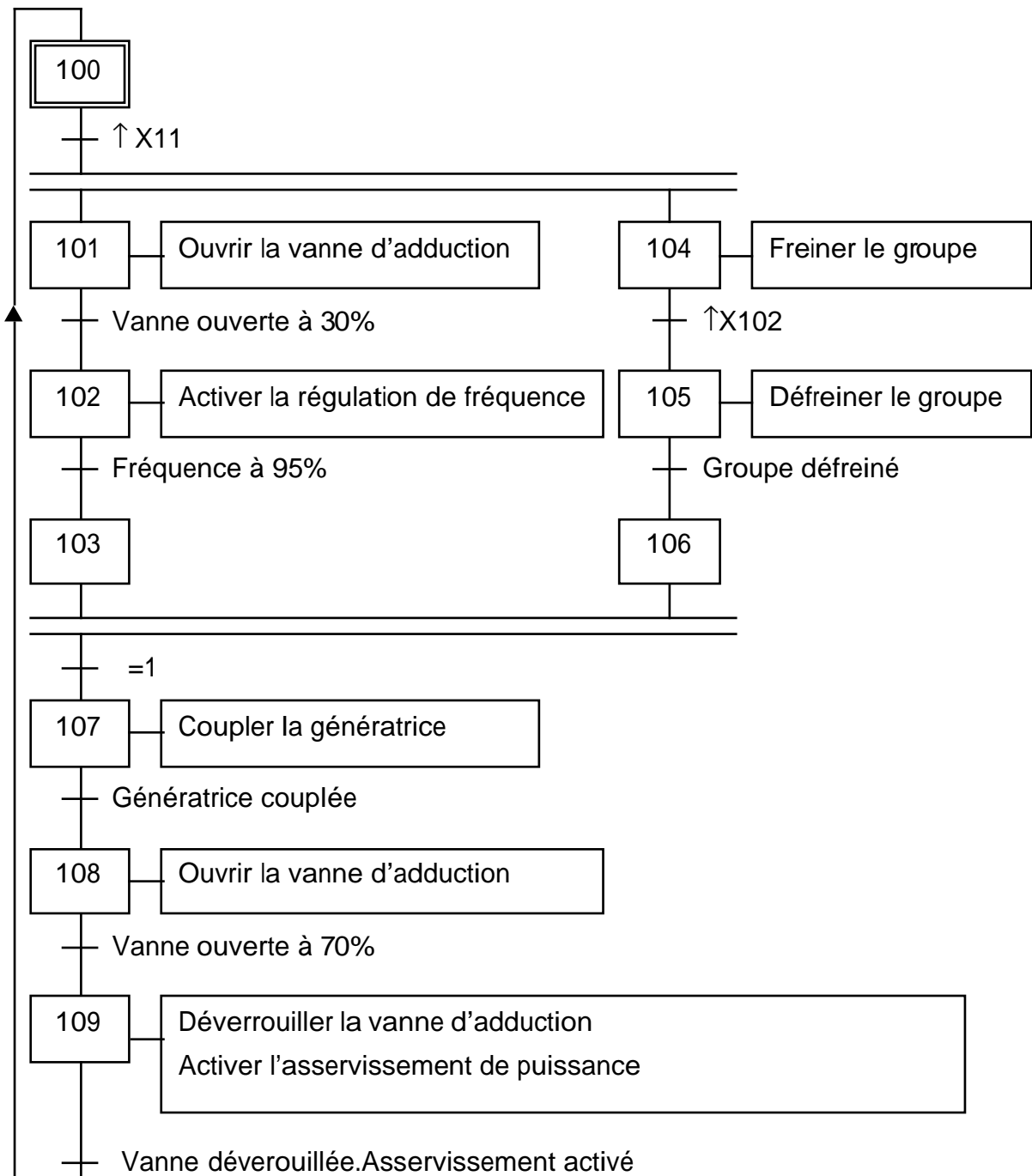


Figure 11 : Graphe de montée en puissance : GMP

Une partie de la procédure de montée en puissance est décrite par le graphe. Elle comprend :

- La gestion de l'ouverture de la vanne d'adduction d'eau ou vanne de pied qui permet de réguler le débit d'eau entrant dans la tuyère de la turbine. Elle fonctionne suivant deux modes « verrouillé » et « déverrouillé ». En mode « déverrouillé » la vanne est pilotée par l'asservissement de puissance.
- La gestion du frein de l'arbre du groupe qui permet de ralentir et de bloquer l'arbre en rotation.
- La gestion du couplage du groupe avec l'alternateur.
- La gestion des régulateurs de puissance et de fréquence qui permettent la production du courant.

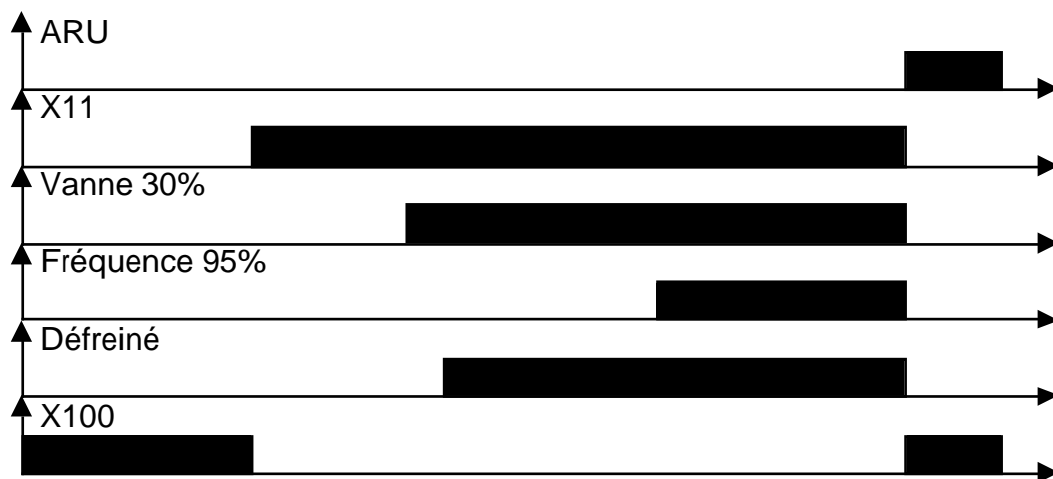


Figure 12 : Chronogramme

C.1.1. Montée en puissance

Q15. Compléter le chronogramme correspondant à la procédure de montée en puissance, pour les variables X101 à X107.

C.2. Gestion des pompes d'injection d'huile

Lors de la mise en rotation de l'arbre de transmission, les pompes d'injection d'huile permettent de créer un film hydrodynamique entre l'arbre et le plateau de pression afin de diminuer les frottements. Quand la fréquence de rotation de l'arbre est suffisante, le seuil hydrodynamique de fonctionnement est atteint et les pompes peuvent être arrêtées.

C.2.1. Fonctionnement normal d'une pompe

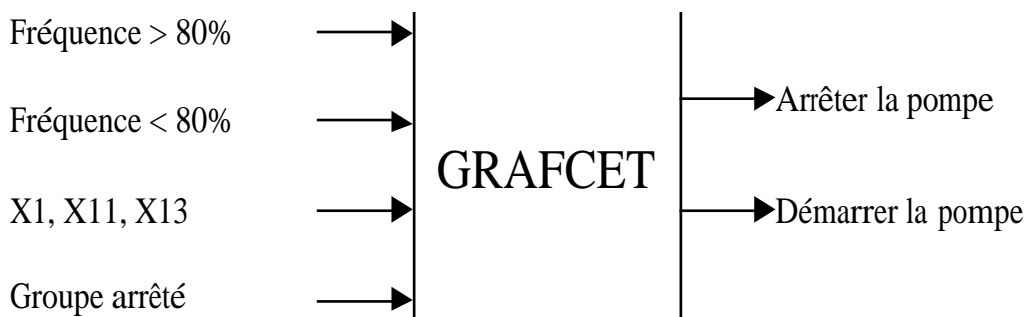


Figure 13 : Graphe des entrées-sorties

Cahier des charges :

Le démarrage de la pompe coïncide avec le début de la procédure de montée en puissance . La pompe est arrêtée lorsque la fréquence de rotation de l'arbre a atteint 80% de sa fréquence nominale.

En procédure d'arrêt, la pompe est remise en marche lorsque la fréquence de rotation repasse en dessous de ce seuil. Elle est arrêtée lorsque le groupe est à l'arrêt.

En cas d'arrêt d'urgence, la pompe est immédiatement mise en marche jusqu'à l'arrêt complet du groupe.

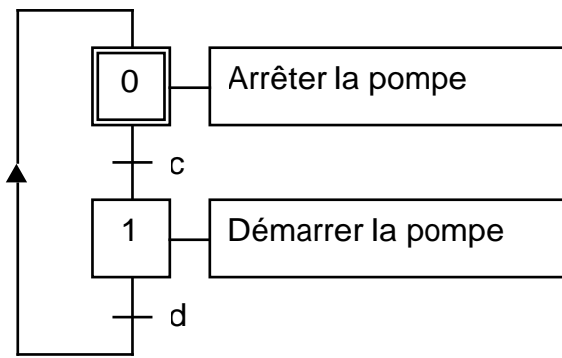


Figure 14 : Fonctionnement normal d'une pompe

Q16. Compléter le GRAFCET du point de vue système, à partir du graphe des entrées-sorties du modèle GRAFCET, en précisant les équations logiques de c et d.

C.2.2. Fonctionnement normal des deux pompes

Cahier des charges :

Le cahier des charges précédent reste valable et s'applique à chacune des deux pompes. On conserve la notation c et d des réceptivités associées aux transitions de la question précédente. La condition supplémentaire est que les pompes A et B fonctionnent alternativement.

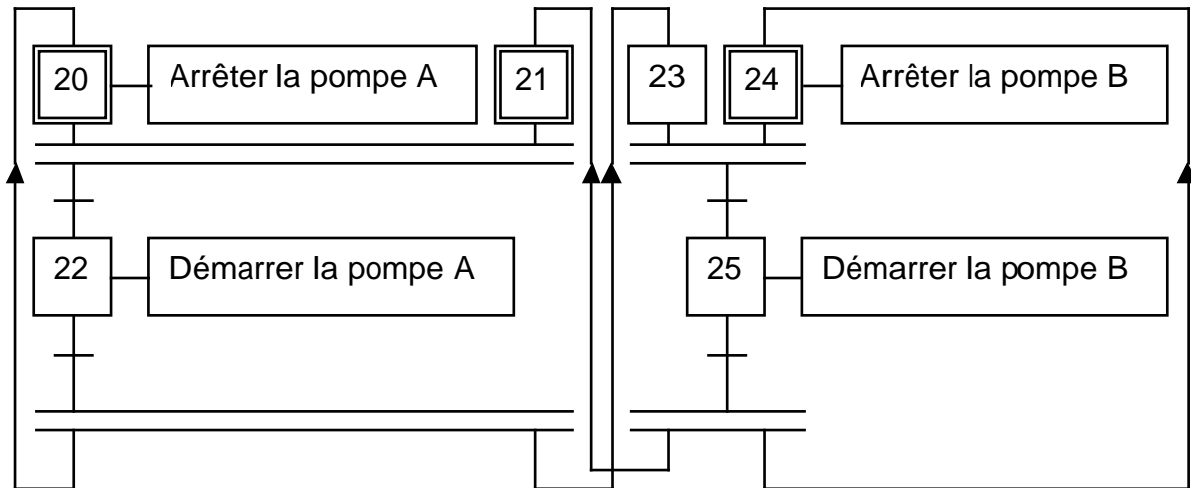


Figure 15 : Fonctionnement normal des deux pompes

Q17. Compléter le GRAFCET du point de vue système, afin d'assurer le fonctionnement normal des pompes.

C.2.3. Fonctionnement complet des deux pompes.

Cahier des charges :

Lors d'une panne ou pour effectuer la maintenance de l'une des deux pompes, il est nécessaire d'immobiliser l'une des deux pompes. Lorsque l'opérateur décide d'immobiliser l'une des deux pompes « Arrêt pompe A » (réceptivité a) ou « Arrêt pompe B » (réceptivité b), le cycle de fonctionnement ne fait intervenir qu'une seule pompe. L'absence de ces informations assure un fonctionnement normal des deux pompes.

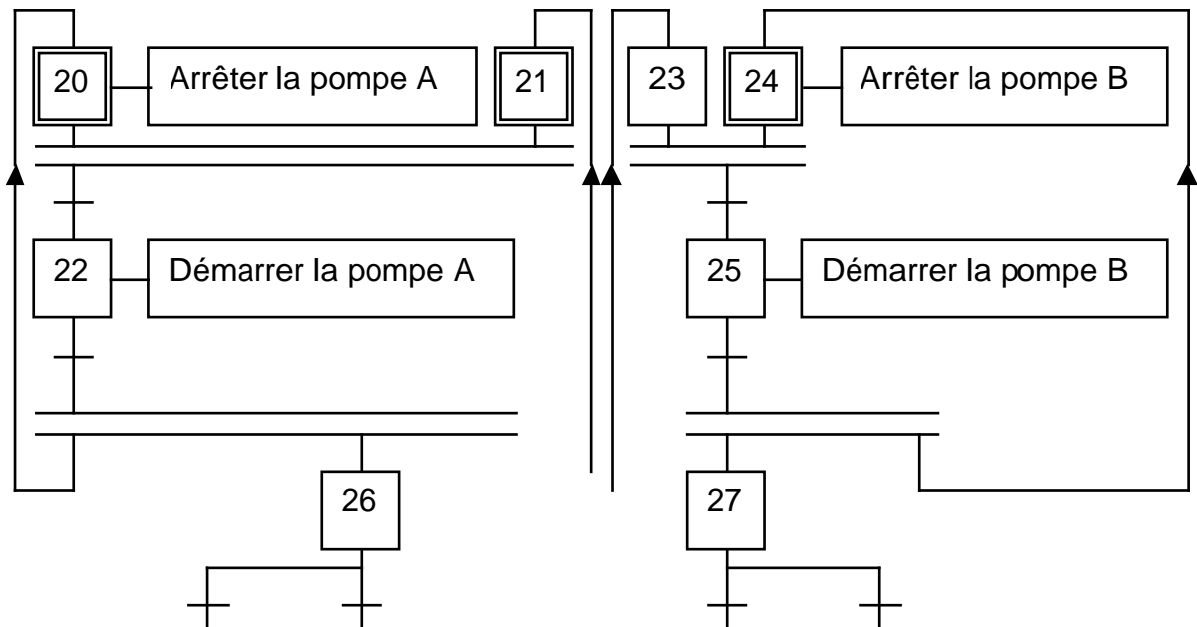


Figure 16 : Fonctionnement complet des deux pompes

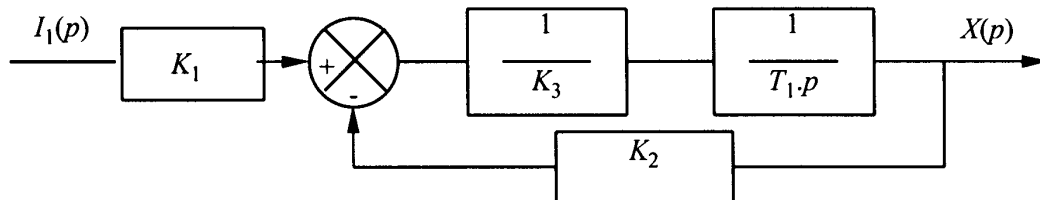
Q18. Compléter le GRAFCET du point de vue système, afin d'assurer le fonctionnement complet des pompes.

D. Régulation de fréquence

D.1. Étude du premier et second étage de la servovalve

D.1.1. Modélisation

L'étude dynamique de la palette et du piston des deux premiers étages de la servovalve, permet d'obtenir la modélisation fonctionnelle :



On considère toutes les conditions initiales nulles.

D.1.2. Fonction de transfert

On pose :

$$G_1(p) = \frac{K}{1 + T p}$$

Q19. Montrer que la fonction de transfert $\frac{X(p)}{I_1(p)}$ peut être identifiée à $G_1(p)$ et déterminer K et T en fonction de K_1 , K_2 , K_3 et T_1 .

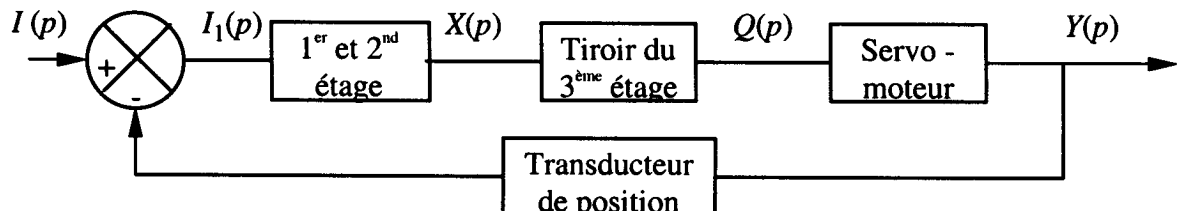
D.1.3. Réponse indicielle

Q20. Donner l'allure de la réponse indicielle, en précisant les pentes, asymptote et valeurs caractéristiques. Préciser le temps de réponse à 5%.

D.2. L'ensemble servovalve - servomoteur

D.2.1. Modélisation

La modélisation proposée pour cet ensemble est :



Hypothèses simplificatrices :

La fonction de transfert du tiroir du troisième étage est équivalente à un gain.

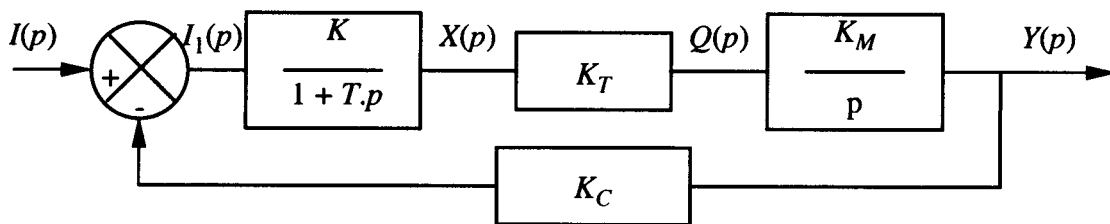
La fonction de transfert du transducteur est équivalente à un gain.

La fonction de transfert du servomoteur s'écrit :

$$G_2(p) = \frac{K_M}{p}$$

D.2.2. Fonction de transfert

La modélisation de l'ensemble devient :



On pose :

$$K_4 = K K_T K_M K_C$$

Q21. Déterminer la fonction de transfert en boucle ouverte, $H_3(p)$.

D.2.3. Courbe de réponse en fréquence

Q22. Tracer la courbe de réponse en fréquence dans le plan de NYQUIST en précisant les valeurs particulières pour ω tendant vers 0, $\omega = 1/T$ et ω tendant vers l'infini. Indiquer la tangente au point O.

Q23. Le système est-il stable ? Placer graphiquement la marge de phase. Donner la valeur de la marge de gain.

D.2.4. Précision de cet asservissement de position

Q24. Déterminer l'écart statique ε_0 et l'écart de traînage ε_v .

D.2.5. Rapidité de cet asservissement de position

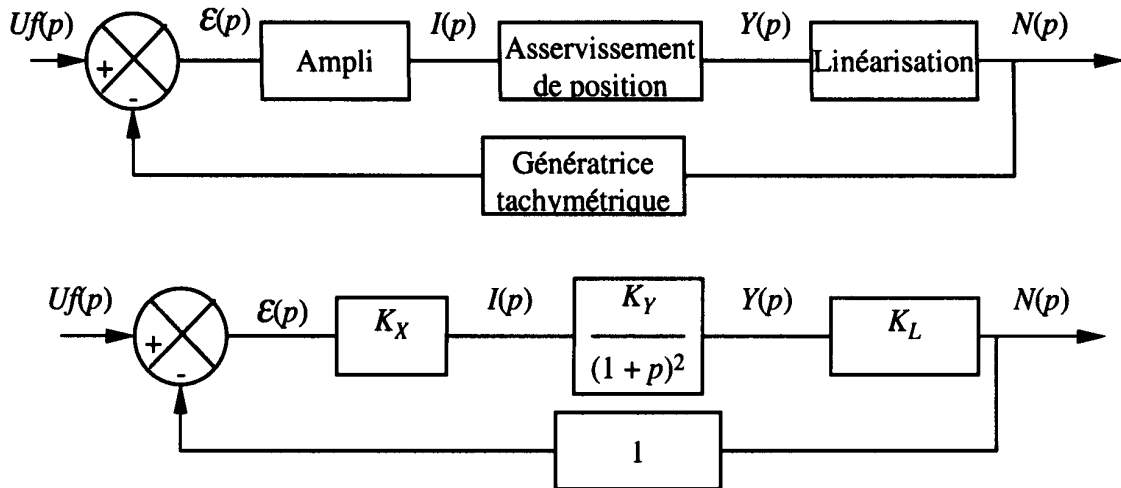
On donne les valeurs numériques :

$$K_4 = 0,5 \text{ et } T = 0,5\text{s.}$$

Q25. Déterminer la fonction de transfert en boucle fermée $G_3(p)$. Identifier l'amortissement ξ et la pulsation propre non amortie ω_0 .

Q26. Donner l'allure de la réponse indicielle en précisant les pentes, asymptotes et valeurs caractéristiques.

D.3. Régulation de fréquence



Les quantités K_X , K_Y et K_L sont des gains constants.

D.3.1. Fonction de transfert

Q27. Donner la fonction de transfert en boucle ouverte : $H_4(p)$.

D.3.2. Diagrammes

Pour ce tracé et pour les questions suivantes, on considère que $H_4(p)$ possède un gain statique de 100.

Q28. Tracer dans le plan de BODE l'allure des diagrammes d'amplitude et de phase de $H_4(p)$, en précisant les asymptotes et leurs pentes, le gain statique, la pulsation propre non amortie du système, l'allure réelle de la fonction et la marge de phase.

D.3.3 Précision de la régulation

Q29. Déterminer l'expression analytique de l'écart statique.

D.3.4. Correction de la régulation

On souhaite améliorer les performances de cette régulation en ajoutant un correcteur de type P.I. afin d'obtenir :

- Un écart statique nul.
- Une marge de phase $\Delta\phi = 45^\circ$.

On conserve la valeur ci-dessus du gain statique de $H_4(p)$.

On installe le correcteur :

$$C(p) = K_i + \frac{K_i}{p}$$

Pour obtenir :

$$H_5(p) = C(p) H_4(p)$$

Q30. Déterminer analytiquement le coefficient K_i du correcteur.

Q31. Tracer dans le plan de BODE l'allure des diagrammes d'amplitude et de phase de $H_5(p)$, en précisant sur les diagrammes les asymptotes et leurs pentes, l'allure réelle de la fonction et les valeurs particulières.

Diagramme de BODE R28

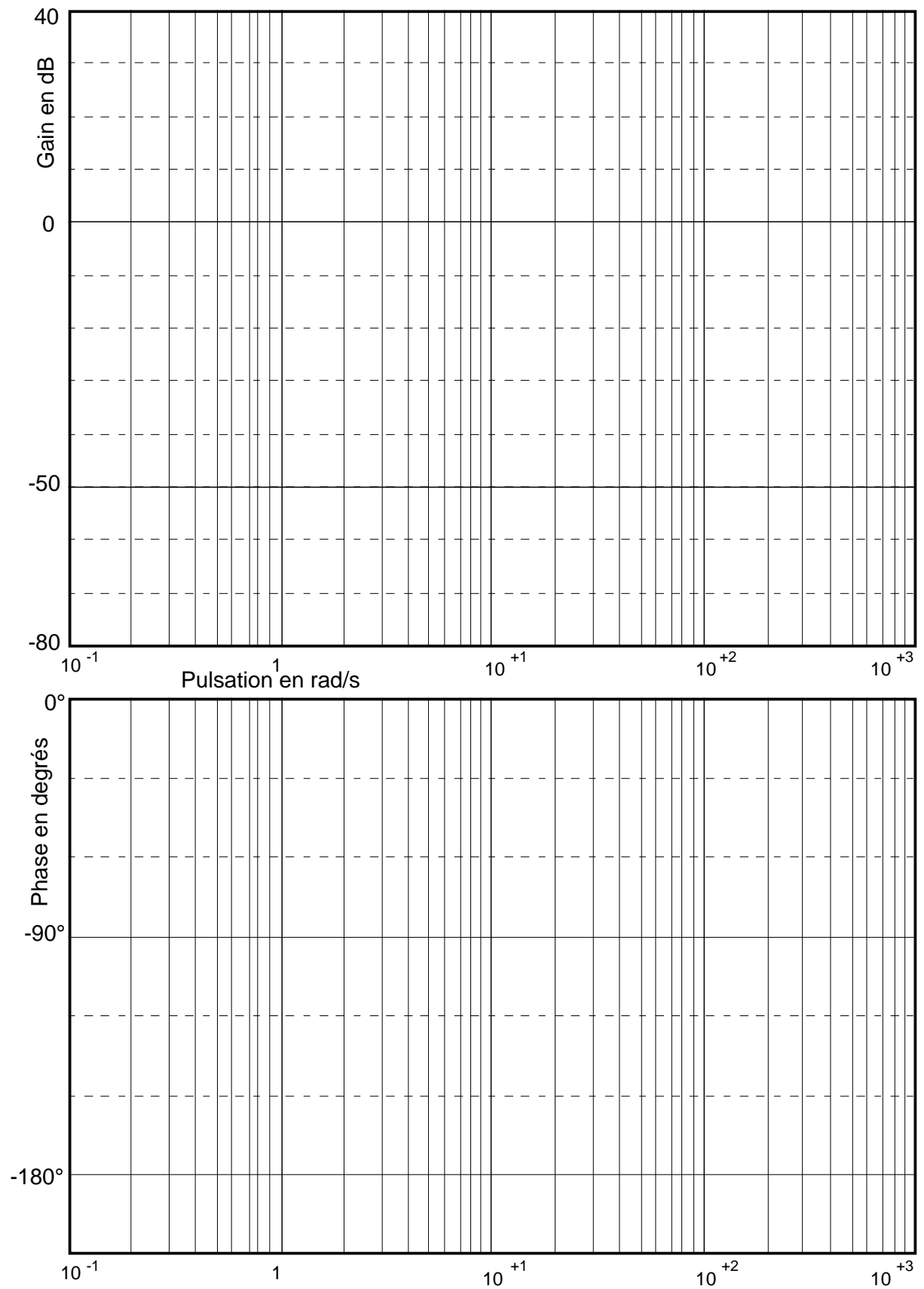


Diagramme de BODE R31

