

SESSION 2025

**AGREGATION
CONCOURS EXTERNE**

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

**Options : sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie électrique
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie des constructions
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie informatique**

**ANALYSE ET EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE
D'UN SYSTÈME PLURITECHNOLOGIQUE**

Durée : 6 heures

Calculatrice autorisée selon les modalités de la circulaire du 17 juin 2021 publiée au BOEN du 29 juillet 2021.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Il appartient au candidat de vérifier qu'il a reçu un sujet complet et correspondant à l'épreuve à laquelle il se présente.

Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier.

Le fait de rendre une copie blanche est éliminatoire

Tournez la page S.V.P.

INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

Option : sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1414A	101	7175

Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie électrique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1415A	101	7175

Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie des constructions

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1416A	101	7175

Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie informatique

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1417A	101	7175

Définition de l'épreuve

Elle a pour but de vérifier que le candidat est capable de mobiliser ses connaissances scientifiques et techniques pour conduire une analyse systémique, élaborer et exploiter les modèles de comportement permettant de quantifier les performances globales et détaillées d'un système des points de vue matière, énergie et information afin de valider tout ou partie de la réponse au besoin exprimé par un cahier des charges. Elle permet de vérifier les compétences d'un candidat à synthétiser ses connaissances pour analyser et modéliser le comportement d'un système pluritechnologique automatique.

Conseils aux candidats

Il est demandé aux candidats :

- de rédiger les réponses aux différentes parties sur des feuilles de copie séparées et clairement repérées ;
- de numéroter chaque feuille de copie et indiquer le numéro de la question traitée ;
- de rendre tous les documents réponses, même non complétés ;
- d'utiliser exclusivement les notations indiquées dans le sujet lors de la rédaction des réponses ;
- de justifier clairement les réponses ;
- d'encadrer ou souligner les résultats ;
- de présenter lisiblement les applications numériques, sans omettre les unités, après avoir explicité les expressions littérales des calculs ;
- de formuler les hypothèses nécessaires à la résolution des problèmes posés si celles-ci ne sont pas indiquées dans le sujet.

Organisation du sujet

Ce sujet se décompose de la façon suivante :

- l'énoncé du sujet commençant par la mise en situation et comportant 66 questions (pages 2 à 31) ;
- le dossier technique comportant 13 documents techniques : **DT1** à **DT13** (page 32 à 46) ;
- le dossier réponse comportant 7 documents réponse : **DR1** à **DR7** (page 47 à 51).

Recommandations

L'étude est composée de cinq parties :

- Partie I : Mise en situation
- Partie II : Étude de la production d'électricité
- Partie III : Étude de la régulation de vitesse du groupe hydroélectrique
- Partie IV : Étude dynamique de la turbine
- Partie V : Étude des moyens de maintenance des éléments d'un groupe hydroélectrique

Ces parties sont indépendantes. Il est toutefois recommandé de les aborder dans l'ordre posé.

Centrale hydroélectrique de Pierre-Bénite

I. MISE EN SITUATION

I.1 Contexte de l'étude

Autour des années 1930, la nécessité pour la France d'augmenter massivement, au meilleur coût, la production hydroélectrique, a conduit la compagnie nationale du Rhône (CNR) à mettre au point un programme général d'aménagement du Rhône qui comporta la réalisation de dix-huit centrales hydroélectriques.

Les missions de ce programme, concernèrent :

- la production de 16000 GWh d'électricité par l'ensemble des usines, chaque année ;
- l'agriculture et les possibilités de développement des irrigations dans les plaines du bas-Rhône ;
- la navigation en aval de Lyon, améliorée par les dérivations canalisées et les retenues prévues.

Cette étude porte sur la centrale du site de Pierre-Bénite, située aux portes de Lyon, qui joue un rôle primordial pour la jonction du Rhône avec la Saône et les canaux qui permettent de rejoindre le Rhin, la Moselle et la Meuse, faisant ainsi la liaison entre Mer du Nord et Méditerranée.

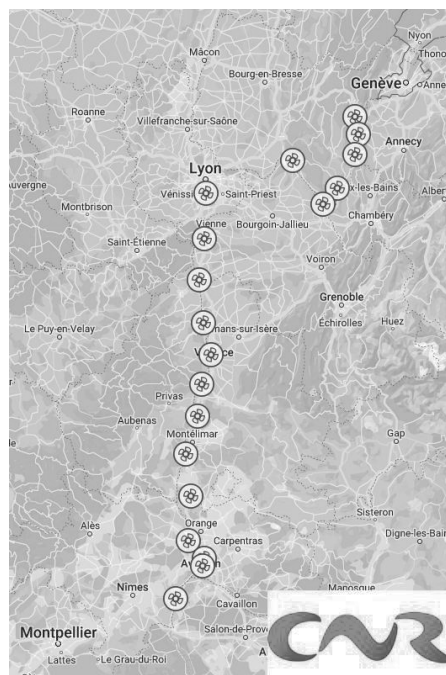


Figure 1 – Sites hydroélectriques de la CNR

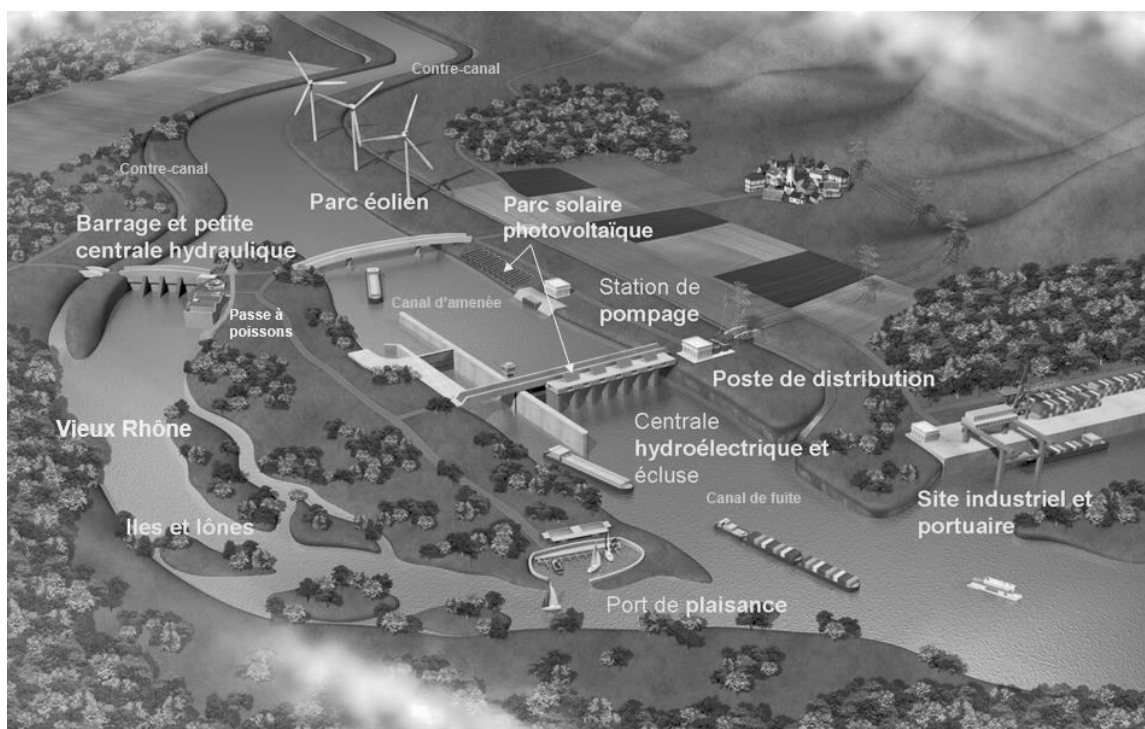


Figure 2 – Aménagement type d'un site de la CNR

I.2 Caractéristiques générales de l'aménagement de l'usine de Pierre-Bénite

La centrale hydroélectrique de Pierre-Bénite est équipée de quatre groupes hydroélectriques à turbines installés chacun dans une conduite hydraulique dont l'axe est situé à 143 m d'altitude. Le débit d'eau qui actionne une turbine peut être modifié en ouvrant plus ou moins la section de passage de la conduite, à l'aide de vingt-quatre pales orientables nommées « pales directrices », disposées autour de la turbine.

Débit moyen : $870 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Étiage* de 10 jours par an : $330 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Altitude de retenue en étiage : 162 m
Altitude de restitution en étiage : 150 m
Chute nette moyenne : 7,7 m
Débit maximal : $1380 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Puissance installée : 80 MW
Productibilité annuelle : 490 GWh

* L'étiage se définit comme une baisse périodique des eaux (d'un cours d'eau) ; le plus bas niveau des eaux ou encore le débit minimal d'un cours d'eau. Cette valeur est annuelle.

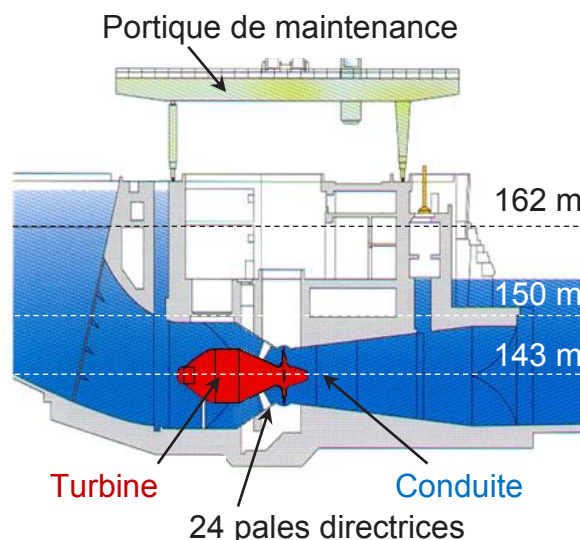


Figure 3 – Schéma en coupe d'une conduite sur l'aménagement de Pierre-Bénite

Chaque turbine est dite « à bulbe » et constituée :

- d'un arbre moteur relié à 4 pales orientables nommées « pales motrices » ;
- d'un alternateur en prise directe avec l'arbre moteur ;
- d'un système de refroidissement utilisant des ailettes et des ventilateurs ;
- d'un bulbe, qui joue le rôle d'enceinte aérodynamique et étanche (à cet effet, l'air est maintenu à une pression de 2 bars à l'intérieur de l'enceinte).

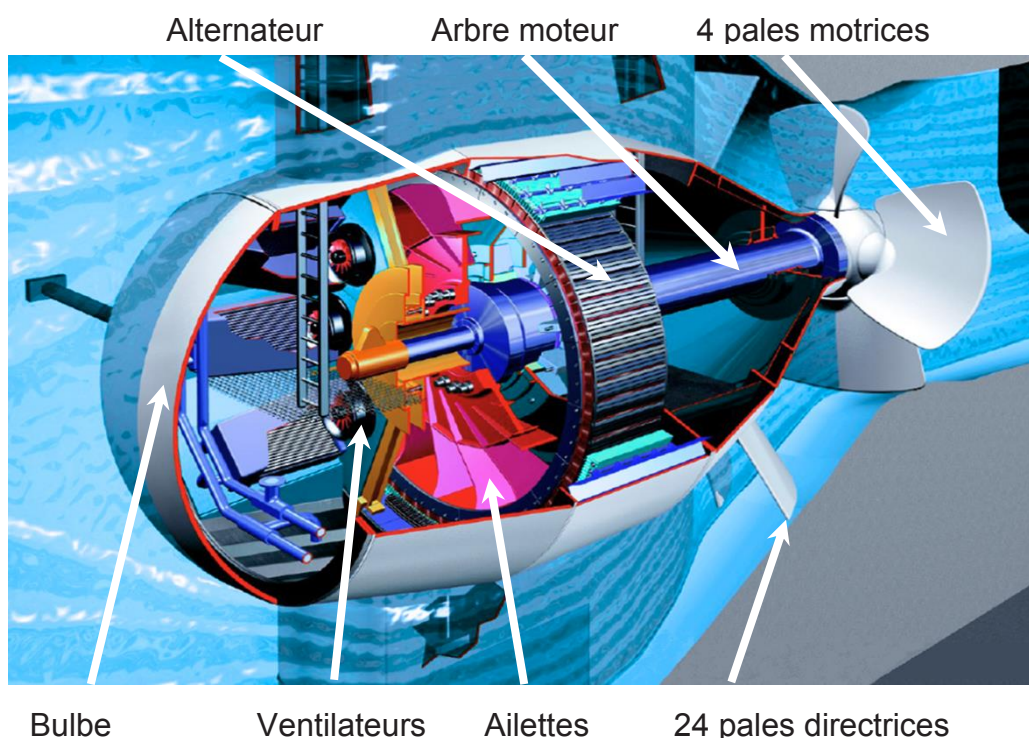


Figure 4 – Schéma de la turbine à bulbe

I.3 Problématique générale

L'électricité ne se stocke pas à grande échelle. La CNR doit donc assurer, en temps réel, un équilibre entre la puissance électrique qu'elle produit et la puissance électrique consommée par ses clients, reliés au réseau électrique européen.

Les installations électriques de la CNR doivent donc permettre de produire de l'électricité selon trois exigences principales :

- une exigence économique : l'électricité doit être produite au meilleur rendement possible ;
- une exigence technique : l'électricité doit être produite à une fréquence maintenue la plus proche possible de la fréquence du réseau électrique (50 Hz) afin de pouvoir s'y connecter ;
- une exigence de sécurité : la hauteur du Rhône doit être contrôlée au niveau de chaque aménagement.

Pour atteindre ces objectifs sur le site de Pierre-Bénite, les ingénieurs de la CNR ont choisi de réguler la vitesse de rotation des turbines des groupes hydroélectriques, qui sont en prise directe avec leurs alternateurs, afin de réguler la fréquence de ces derniers à celle du réseau (50 Hz). Pour que cette régulation se fasse avec un rendement optimal, ils utilisent deux systèmes asservis qui modifient la vitesse de rotation de la turbine.

Dans toute cette étude, ces deux dispositifs d'asservissement seront nommés :

- le vannage : asservissement de la position angulaire des pales directrices ;
- le turbinage : asservissement de la position angulaire des pales motrices.

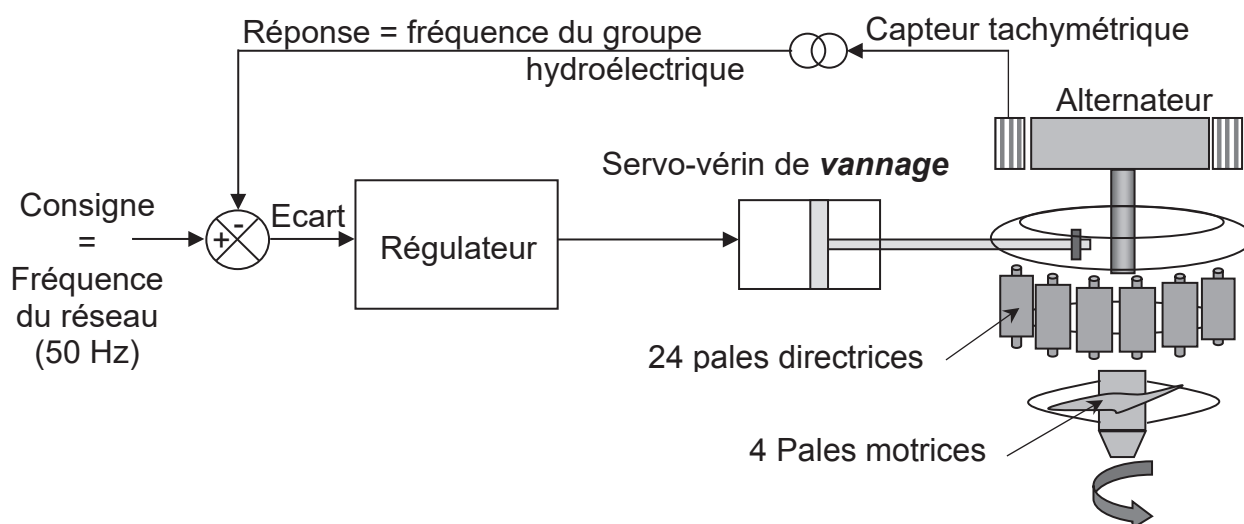


Figure 5 – Schéma de principe de la régulation de fréquence d'un groupe électrique
(Remarque : seul le servo-vérin de vannage est représenté sur ce schéma, mais le dispositif utilise également un servo-vérin de turbinage pour incliner les pales motrices)

II. ÉTUDE DE LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Objectif : Valider la capacité du site à produire de l'énergie électrique à une valeur fixée et constante de fréquence.

Pour garantir de l'électricité à tout le monde, le réseau électrique se doit de couvrir tout le territoire. En France, ce sont près de 1,6 millions de kilomètres de lignes électriques qui maillent le pays, entre réseau de transport et réseau de distribution.

Qu'elle soit produite dans les centrales nucléaires, les parcs éoliens, les barrages hydroélectriques ou les centrales solaires, l'électricité parcourt le vaste réseau électrique pour arriver instantanément chez le consommateur. Le développement et la modernisation des réseaux électriques pour accueillir les énergies renouvelables constituent un élément essentiel de la transition énergétique.

Notations :

- f : fréquence des signaux électriques
- ω : pulsation des signaux électriques
- P : puissance active
- S : puissance apparente
- Q : puissance réactive
- V : valeur efficace de la tension simple
- U : valeur efficace de la tension composée

Les valeurs nominales sont indicées n, et la représentation complexe d'un signal sinusoïdal $x(t)$ notée \underline{X} .

II.1 Effet de la variation de la consommation électrique

Face aux évolutions normales de la consommation et aux divers aléas rencontrés en exploitation (pertes d'unités de production ou de charge...), le maintien de l'équilibre production-consommation de puissance électrique doit être assuré à chaque instant afin de maintenir une valeur satisfaisante de la fréquence. Pour réaliser cette adaptation du bilan production-consommation, il faut disposer de réserves de puissances mobilisables. Les différents réglages sont présentés sur le DT1.

Q1. À partir du DT1, expliquer les différentes stratégies mises en œuvre ainsi que leurs limites pour prévenir une variation de fréquence trop importante sur le réseau électrique.

Afin de répartir les effets du déséquilibre production-consommation sur l'ensemble des sites de production réglant, un statisme est introduit.

Le statisme s est une grandeur sans dimension définie comme le rapport entre deux

écarts relatifs :
$$s = \frac{\Delta f_{pu}}{\Delta P_{pu}}$$

Dans le système des valeurs réduites notées « pu » (per unit) les grandeurs adimensionnelles s'obtiennent en divisant chaque grandeur par une grandeur de même dimension appelée base. Les grandeurs de bases utilisées sont P_n , et f_n .

Exigences réglementaires :

- l'arrêté du 9 juin 2020 relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement aux réseaux d'électricité stipule que « Le statisme est réglable entre 3 % et 12 % (en valeur absolue) ».
- la norme NF EN 50160 impose une fréquence de 50 Hz \pm 1 %.

Dans un premier temps la puissance de consigne de l'alternateur sera égale à sa puissance nominale.

- Q2.** À partir des DT2 et DT3, relever la valeur minimale de surfréquence Δf déclenchant le réglage primaire, ainsi que la valeur minimale du gain K, puis calculer la puissance produite P par un alternateur après le déclenchement du réglage primaire dans les conditions précédentes.
- Q3.** Conclure sur la variation de la fréquence suite à une baisse du soutirage électrique par rapport à l'injection. Expliquer l'effet sur la fréquence dans le cas d'une hausse du soutirage électrique par rapport à l'injection.
- Q4.** Calculer la valeur du statisme de l'alternateur correspondant au cas d'utilisation précédent, puis commenter le résultat obtenu au regard des exigences réglementaires.

Le groupement de Vienne comprend quatre sites de production d'hydroélectricité :

- Pierre-Bénite : 80 MW en 4 groupes identiques réglant ;
- Vaugris : 72 MW en 4 groupes identiques, 2 groupes réglant et 2 groupes fixes ;
- Sablons : 160 MW en 4 groupes identiques réglant ;
- Gervans : 120 MW en 4 groupes identiques réglant.

Les groupes « réglant » du groupement de Vienne fonctionnent à 90 % de leur charge nominale. Les groupes fixes fonctionnent à 100 % de leur charge nominale. La régulation primaire est réalisée avec un statisme de 8 %.

Par l'interconnexion des réseaux électriques, la réserve primaire totale correspond à la somme des réserves primaires de tous les groupes participant au réglage. Dans le cadre du scénario d'incident suivant, on se limite au groupement de Vienne en considérant les échanges nuls avec les groupements voisins.

- Q5.** Calculer la variation de fréquence sur le réseau en cas du décrochage de la centrale de Pierre Bénite (avant la réaction du réglage primaire). En déduire la nouvelle valeur de la fréquence.
- Q6.** Calculer la production des centrales du groupement de Vienne et la variation de fréquence sur le réseau après la réaction du réglage primaire suite au décrochage de la centrale de Pierre Bénite. Commenter les résultats obtenus au regard des exigences réglementaires.

À l'échelle européenne, le réseau d'électricité synchrone d'Europe continentale voit sa fréquence chuter de 20 mHz lors du scénario d'incident de référence prévu pour une perte de production de 3000 MW.

- Q7.** Conclure sur le risque d'effondrement de la fréquence du réseau européen. Expliquer l'impact de la croissance des énergies renouvelables sur la stabilité en fréquence du réseau électrique.

II.2 Raccordement et transfert de puissance sur le réseau public d'électricité

Le site de production de Pierre-Bénite comprend 4 groupes qui sont connectés au réseau public électrique. Chaque groupe utilise une machine synchrone triphasée dont le stator est couplé en étoile.

Toutes les grandeurs sont supposées parfaitement sinusoïdales.

Les génératrices synchrones sont supposées non saturées et sont représentées par le modèle de Behn-Eschenburg, dont le schéma équivalent par phase est le suivant :

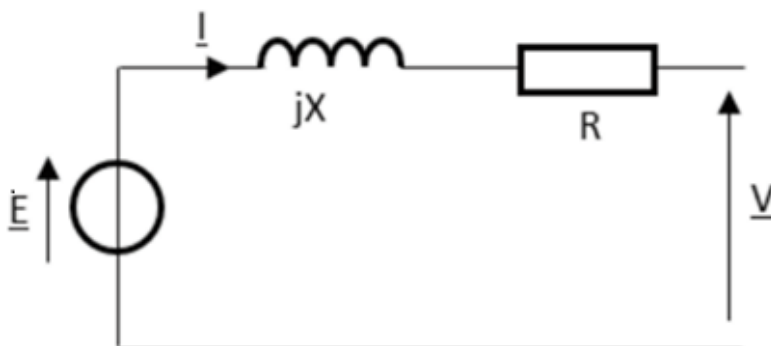


Figure 6 – Modèle de Behn-Eschenburg équivalent par phase

E : module de la force électromotrice (fem) induite par phase

X : réactance synchrone

R : résistance d'un enroulement statorique

V : module de la tension aux bornes du stator

I : module de l'intensité du courant

φ : déphasage (\vec{I} ; \vec{V})

δ : angle interne (\vec{V} ; \vec{E})

En phase de production, les machines synchrones de la centrale hydroélectrique génèrent un système direct de tensions triphasées $V_A(t)$, $V_B(t)$, $V_C(t)$ supposées parfaitement sinusoïdales.

Le raccordement au réseau électrique en toute sécurité nécessite la validation de plusieurs conditions qui sont atteintes grâce à une bonne connaissance du modèle de la machine synchrone. Des essais sont donc réalisés afin de pouvoir piloter correctement la génératrice synchrone en vue du raccordement.

La stabilité de la génératrice synchrone est assurée lorsque l'angle interne δ est inférieur à $\pi/2$.

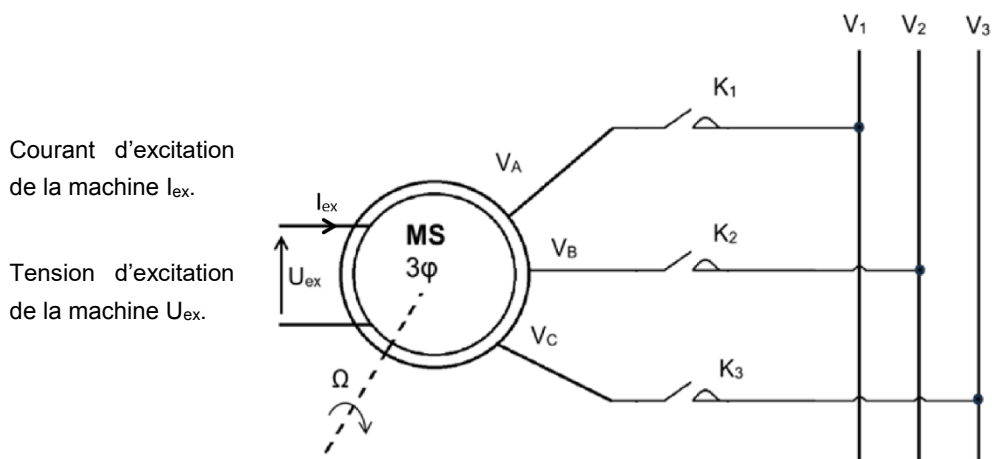


Figure 7 – Schéma de principe de couplage d'une génératrice synchrone sur le réseau électrique

- Q8.** Sur le DR1, identifier les vecteurs associés à chacune des tensions simples $V_1(t)$, $V_2(t)$, $V_3(t)$, et à chacune des tensions composées $U_{12}(t)$, $U_{23}(t)$, $U_{31}(t)$, du réseau électrique dans le cas d'un système triphasé équilibré direct. Donner l'expression des tensions simples en fonction de V et ω et l'expression des tensions composées en fonction de U et ω .
- Q9.** Compléter le DR2 en représentant le couplage du stator puis en proposant un schéma de la mesure de la résistance à chaud entre deux phases. Donner la valeur de la résistance R d'une phase du stator à partir des résultats des essais du DT4.
- Q10.** À partir des résultats des essais du DT4, déterminer la valeur de l'impédance Z de la génératrice puis en déduire la valeur de sa réactance X .
- Q11.** Justifier le modèle équivalent simplifié par phase du DR3. Représenter sur le DR3 le diagramme de Fresnel associé. Donner l'expression de la fem E en fonction de V , I , X et φ .

La machine synchrone est supposée à son point de fonctionnement nominal.

- Q12.** Calculer les valeurs du facteur de puissance $\cos\varphi$, de la puissance réactive Q_N et de la valeur efficace de l'intensité du courant I_N par phase.
- Q13.** Calculer la valeur de la fem E , puis en déduire la valeur du courant d'excitation I_e grâce au DT4.
- Q14.** Donner l'expression de la puissance électrique produite par la génératrice synchrone en fonction de V , E , δ , et X . Calculer la valeur de l'angle interne δ et conclure sur la stabilité du fonctionnement.
- Q15.** Justifier la valeur de la vitesse nominale du rotor. Calculer la valeur de la fréquence des tensions produites si l'alternateur tourne à 90% de sa valeur nominale.
- Q16.** Indiquer les conditions nécessaires sur les tensions générées afin de permettre le raccordement de la génératrice synchrone au réseau électrique.

Le réseau public d'électricité est considéré comme un réseau infini dont la puissance est très grande devant la puissance des groupes de production, il impose donc sa valeur de tension ainsi que sa fréquence. Après un couplage correct, la génératrice synchrone ne débite aucun courant. Il s'agit maintenant de la mettre en charge afin de générer de la puissance électrique.

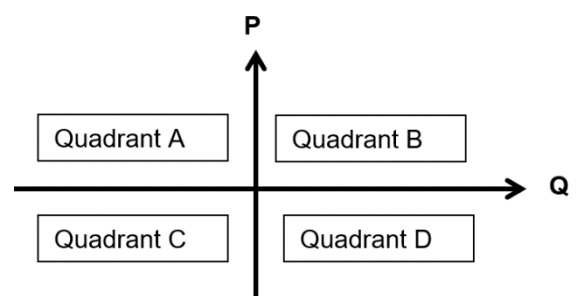


Figure 8 – Quadrants de fonctionnement d'une machine synchrone

L'alternateur est supposé correctement raccordé et mis en charge sur le réseau avec $\cos\varphi = 0,8$.

- Q17.** Indiquer le quadrant correspondant au fonctionnement nominal de la génératrice synchrone étudiée. Conclure sur la capacité du site à produire de l'énergie électrique à une valeur fixée et constante de fréquence.

III. ÉTUDE DE LA RÉGULATION DE VITESSE DU GROUPE HYDROÉLECTRIQUE

Pour les unités de production, le réglage primaire est mis en œuvre par l'action d'une régulation de vitesse qui agit sur les organes d'admission du fluide sur la turbine.

Objectif : Modéliser le système asservi qui permet de réguler la vitesse de rotation de l'alternateur d'un des groupes hydroélectriques, puis valider les choix de composants et les performances de la boucle d'asservissement de vannage.

Conventions d'écriture et hypothèses de la partie III

L'image par la transformation de Laplace d'une fonction temporelle $f(t)$ sera notée $F(p)$, où « p » est la variable de Laplace, homogène à une pulsation.

Le comportement des composants sera supposé linéaire, continu et invariant, avec les conditions de Heaviside validées (conditions initiales nulles).

Les données fournies par les capteurs sont numériques, tout comme les signaux traités dans la chaîne d'information. Leurs fréquences d'échantillonnage sont suffisamment élevées devant la dynamique globale du système pour que toutes les variables du système asservi puissent être considérées comme des fonctions continues du temps.

III.1 Boucles d'asservissements et programme de conjugaison

Pour produire de l'électricité à une fréquence maintenue la plus proche possible de la fréquence du réseau européen f_0 (50 Hz), l'installation du site de Pierre-Bénite utilise une régulation de la vitesse de rotation des turbines des groupes hydroélectriques.

Pour réaliser cette régulation avec un rendement optimal, il est nécessaire d'utiliser les deux asservissements décrits lors de la problématique générale (paragraphe I.3) et sur le schéma de la figure 9 :

- l'asservissement de vannage, qui asservit la position angulaire des pales directrices disposées dans la conduite, ayant pour conséquence de modifier la section de la veine fluide qui propulse la turbine et donc sa vitesse de rotation ;
- l'asservissement de turbinage, qui asservit la position angulaire des pales motrices de la turbine et donc sa vitesse de rotation.

La régulation de fréquence avec un rendement maximal est ainsi facilitée, puisque ces deux asservissements permettent chacun de modifier la vitesse de rotation de la turbine. Les ingénieurs de la CNR disposent de deux asservissements indépendants pour s'adapter aux variations des éléments extérieurs qui agissent sur le système :

- variation de la consigne $F_0(p)$: lorsque la fréquence du réseau varie, en cas de forte consommation par exemple (elle peut alors diminuer à 49 Hz) ;
- variation de la perturbation $H_{chute}(p)$: lorsque la hauteur de chute d'eau de la veine fluide qui propulse la turbine varie, en cas de forte pluie par exemple.

Un programme de conjugaison, objet de cette étude, calcule la consigne de turbinage idéale $T_{\%C}(p)$, qui permet pour une consigne de vannage $V_{\%C}(p)$ et une hauteur de chute d'eau $H_{chute}(p)$ données, de produire de l'électricité à la fréquence de 50 Hz avec un rendement maximal.

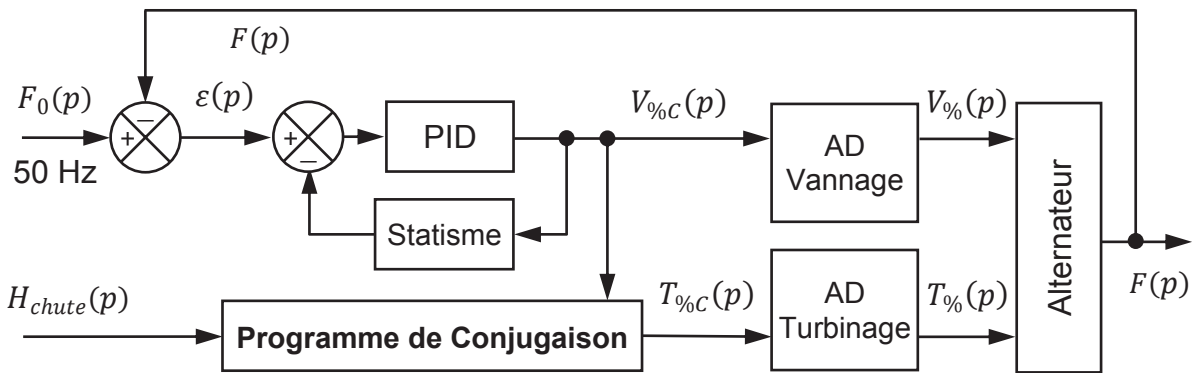


Figure 9 – Schéma de principe de la régulation de vitesse du groupe hydroélectrique

- $F_0(p)$: consigne de fréquence : celle du réseau européen à 50 Hz
 $F(p)$: réponse en fréquence du groupe hydroélectrique (= celle de l'alternateur)
 $H_{chute}(p)$: perturbation liée à la hauteur de la veine fluide qui propulse la turbine
 $\varepsilon(p)$: écart de fréquence
 $V_{\%C}(p)$: consigne de vannage = consigne relative d'ouverture de la conduite
 $T_{\%C}(p)$: consigne de turbinage = consigne relative d'inclinaison des pales motrices
 $V_{\%}(p)$: réponse de vannage = pourcentage réel d'ouverture de la conduite
 $T_{\%}(p)$: réponse de turbinage = pourcentage réel d'inclinaison des pales motrices
PID : correcteur à actions proportionnelle, intégrale et dérivée
Statisme : modèle de la relation entre fréquence et puissance électriques
AD : asservissement de (vannage ou turbinage)

Les mécanismes permettant de réaliser les asservissements de vannage et de turbinage sont représentés sur le DT5 :

- la valeur de turbinage mesurée $T_{\%}$ est relative à l'inclinaison des pales motrices, tel que pour $T_{\%} = 0\% = 0$, les pales motrices sont à leur position de référence (0°) et pour $T_{\%} = 100\% = 1$, les pales sont inclinées de 70° .
- la valeur de vannage mesurée $V_{\%}$ est relative à l'inclinaison des pales directrices, qui est obtenue grâce à l'action d'un vérin de vannage.
 $V_{\%} = 0\% = 0$, lorsque la conduite est fermée : les pales directrices ainsi que la tige du vérin sont à leurs positions de référence respectives (0° et 0 mm).
 $V_{\%} = 100\% = 1$, lorsque la conduite est complètement ouverte : les pales directrices sont inclinées de 90° et la tige du vérin est sortie de 1000 mm.

Le programme de conjugaison fait une interpolation linéaire des résultats obtenus lors de trois séries d'essais réalisés sur le site de Pierre-Bénite, à trois dates différentes et avec trois hauteurs de chute d'eau mesurées respectivement à 6m, à 9,15 m et à 14,8 m. Chaque hauteur est supposée constante le jour de la série d'essais.

Les résultats des trois séries sont enregistrés dans le fichier texte « essais_PB.txt » utilisé par le programme de conjugaison imprimés respectivement sur le DT6 et le DT7. Les essais ont consisté à rechercher les valeurs de turbinage idéales (turbinage_°) à régler pour atteindre le rendement maximal de production électrique, en fonction de la hauteur de chute (H_{chute}) du jour de la série et de la valeur réelle de vannage (vannage_mm) obtenue en réglant la position de la tige du vérin de vannage.

À ce stade, la compréhension du sujet sera grandement facilitée en consultant :

- les résultats des trois séries d'essais expérimentaux enregistrés dans le fichier texte « essais_PB.txt » du DT6, qui sont représentés sur la figure 10 ci-dessous ;
- les résultats du calcul d'interpolation linéaire exécuté par le programme de conjugaison, qui sont représentés sur le fichier image présent sur la 3^{ème} page du DT7 et nommé « Résultats_d_interpolation_linéaire.png ».

Le protocole expérimental mis en œuvre lors des trois séries d'essais définit les valeurs des vingt consignes successives de vannage à utiliser avant de rechercher les valeurs de turbinage idéales associées. Les valeurs réelles de vannage réglées et mesurées au cours des trois séries, seront ainsi supposées identiques.

Les valeurs réelles de turbinage relevées lors des trois journées d'essais, sont représentées sur le graphe avec les symboles (●■▲).

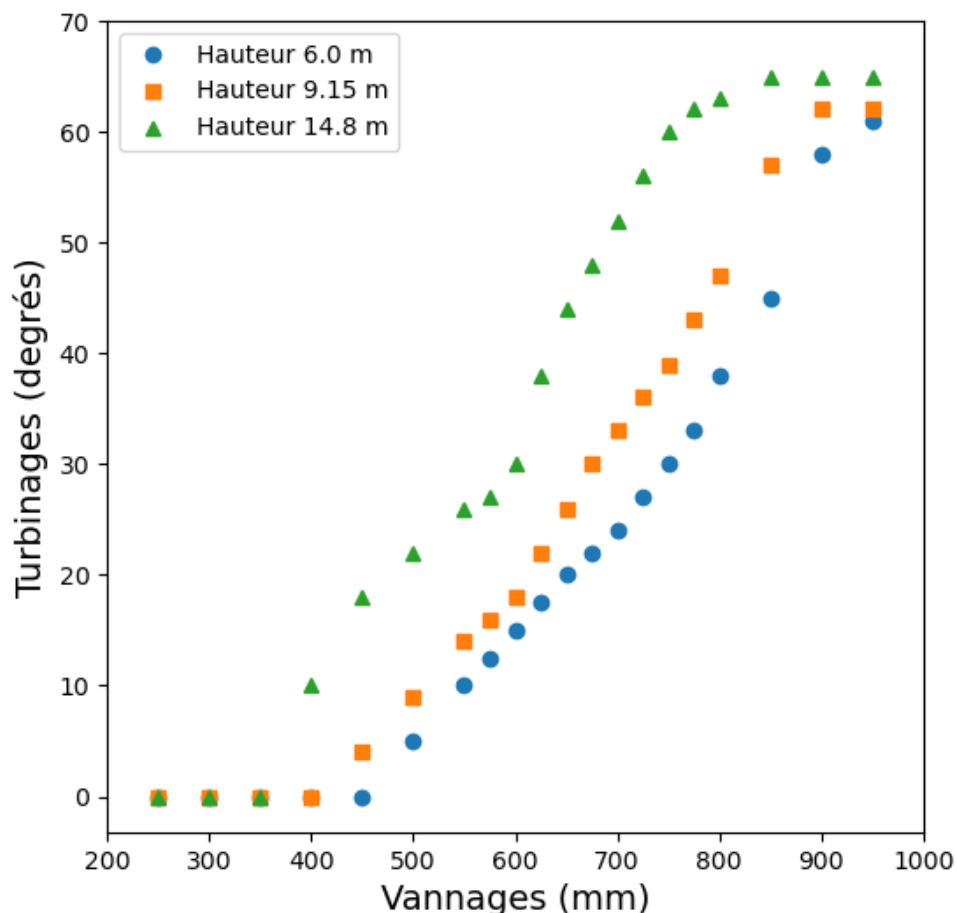


Figure 10 – Graphique des « Essais de conjugaison » enregistrés sur le DT6

Les consignes de vannage utilisées, évoluent de 250 mm à 950 mm ce qui correspond à une plage de 25 % à 95 % d'ouverture de la conduite d'eau. Celle-ci n'est jamais complètement fermée pour améliorer la circulation d'eau dans le canal de dérivation.

Les résultats des trois séries d'essais, illustrés sur la figure 10, montrent que jusqu'à 350 mm (35 % de vannage), il n'est jamais nécessaire d'incliner les pales motrices de la turbine (0° = 0 % de turbinage) pour atteindre le rendement maximal.

Le programme de conjugaison est donné en grande partie sur le DT7. Il a été conçu en trois étapes principales clairement identifiées. Certaines lignes de code et/ou certains commentaires ont volontairement été enlevés et font l'objet des questions suivantes, qui suivent l'ordre chronologique des trois étapes du programme. Les fonctions de base de Python sont rappelées sur le DT8.

1^{ère} étape : Récupération des données du fichier d'entrée (essais_PB.txt)

Q18. Compléter, sur copie, les instructions dans la boucle « for ligne in lignes » :

- de la ligne 30, qui permet de supprimer les caractères de saut de ligne, puis
- de la ligne 31, qui permet de convertir les 'virgules' en 'points' pour pouvoir interpréter les nombres dans Python.

Q19. Expliquer le rôle de la fonction « isVector(valeur_essais) » utilisée à la ligne 33, puis ce qu'exécute le script du programme de la ligne 34 à la ligne 38 incluse.

Q20. Décrire ce que contient exactement l'élément « turbinage » lorsque le programme a fini d'exécuter l'instruction de la ligne 41 :

```
41     turbinage=float(valeurs_essai[2])/reference_turbinage
```

2^{ème} étape : Classement des séries et de leurs données

Les lignes 56 et 57 rappellent les hypothèses utilisées dans la mise en œuvre du protocole expérimental. Les valeurs réelles de vannage, réglées au cours des trois séries, sont les mêmes pour chaque série.

Q21. Proposer, sur copie, les instructions d'une boucle « for » (lignes 60 et 61 ou davantage) qui permettent d'enregistrer les vingt valeurs relatives réelles de vannage, dans le vecteur « V_vannage » créé à la ligne 59.

Les lignes 72 à 81 ont été supprimées pour limiter la présentation du programme du DT7. Ces lignes permettent d'afficher le vecteur « V_vannage » commun aux trois séries, puis le vecteur « hauteurs », puis la liste « V_turbinages_list » contenant les trois vecteurs « V_turbinage » propres à chaque série.

Le résultat affiché par un logiciel d'exécution de ce programme ou par une invite de commandes, après l'exécution des lignes 72 à 81 est donné ci-dessous.

```
V_vannage=
[0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.575, 0.6, 0.625, 0.65, 0.675, 0.7, 0.725, 0.75,
0.775, 0.8, 0.85, 0.9, 0.95]
hauteurs=
[6.0, 9.15, 14.8]
V_turbinages_list=
[ [0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.071, 0.143, 0.179, 0.214, 0.25, 0.286, 0.314, 0.343, 0.386,
0.429, 0.471, 0.543, 0.643, 0.829, 0.871]
[0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.057, 0.129, 0.2, 0.229, 0.257, 0.314, 0.371, 0.429, 0.471, 0.514,
0.557, 0.614, 0.671, 0.814, 0.886, 0.886]
[0.0, 0.0, 0.0, 0.143, 0.257, 0.314, 0.371, 0.386, 0.429, 0.543, 0.629, 0.686, 0.743, 0.8,
0.857, 0.886, 0.9, 0.929, 0.929, 0.929] ]
```

3^{ème} étape : Interpolation linéaire des turbinages

Dans le programme de conjugaison, la hauteur H_{chute} est désignée par la variable « h » et comprise dans les deux domaines suivants :

$$h \in [h_1 ; h_2] = [6 \text{ m} ; 9.15 \text{ m}] \text{ et } h \in]h_2 ; h_3] =]9.15 \text{ m} ; 14.8 \text{ m}]$$

Afin de calculer la consigne théorique idéale de turbinage $T_{\%C}(V_{\%}, h)$, le programme de conjugaison utilise une interpolation linéaire des résultats expérimentaux, pour une valeur de vannage donnée $V_{\%}$ et une hauteur de chute d'eau donnée $H_{chute} = h$.

Exemple :

Essais de turbinages $T_{\%}(V_{\%}, h)$ pour un vannage réglé à $V_{\%} = 50 \%$:

$$\begin{aligned} T_{\%}(V_{\%}, h_1) &= T_1(V_{\%}) \approx 7 \% \\ T_{\%}(V_{\%}, h_2) &= T_2(V_{\%}) \approx 13 \% \\ T_{\%}(V_{\%}, h_3) &= T_3(V_{\%}) \approx 31 \% \end{aligned}$$

Dans cet exemple, pour tout $h \in [h_1 ; h_2]$, le coefficient d'interpolation linéaire α , permet de calculer le turbinage idéal :

$$\alpha = \frac{T_{\%C}(V_{\%}, h) - T_1(V_{\%})}{T_2(V_{\%}) - T_1(V_{\%})} = \frac{h - h_1}{h_2 - h_1}$$

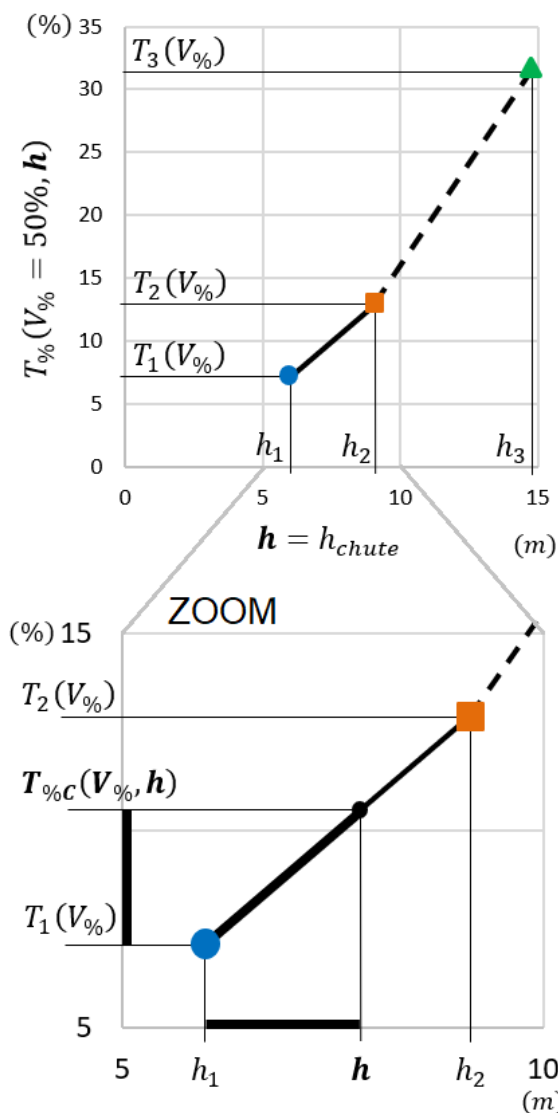


Figure 11 – Schéma de principe de l'interpolation linéaire

Q22. Recopier le début de la fonction commencée à la ligne 88, puis proposer la suite des instructions (en veillant à ce que les indentations de boucle soient parfaitement visibles) réalisant la fonction d'interpolation linéaire qui renvoie le vecteur « $V_{turbinage_lin}$ » contenant les valeurs théoriques de turbinage, en utilisant les valeurs relatives expérimentales de turbinage contenues dans la liste « $V_{turbinages_list}[i]$ » et en testant le domaine d'évolution de la variable « h ».

III.2 Modélisation de l'asservissement de vannage

L'asservissement de vannage, représenté par le bloc « AD Vannage » sur la figure 9, est un système d'ouverture variable de la conduite d'eau, qui reçoit la consigne d'ouverture notée « $V_{\%C}(p)$ » en pourcentage d'ouverture, qui a été élaborée avec l'objectif d'obtenir la vitesse de rotation souhaitée de la turbine, comme vu précédemment. Le pourcentage réel d'ouverture de la conduite $V_{\%}(p)$ est commandé par le système asservi décrit figure 12.

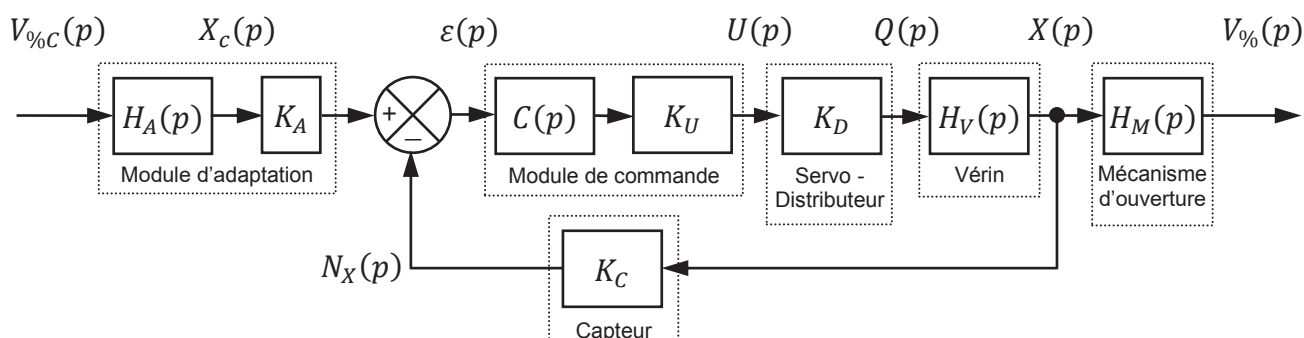


Figure 12 – Schéma de principe de l'asservissement de vannage

- $V_{\%C}(p)$: consigne de vannage = consigne d'ouverture de la conduite en pourcentage
- $X_c(p)$: consigne de position de la tige du vérin par rapport au corps du vérin
- $U(p)$: tension de commande du servo-distributeur hydraulique
- $Q(p)$: débit volumique de commande du vérin
- $X(p)$: position réelle de la tige du vérin par rapport au corps du vérin
- $V_{\%}(p)$: réponse de vannage = pourcentage réel d'ouverture de la conduite
- $N_X(p)$: mesure de la position de la tige du vérin par rapport au corps du vérin
- $H_A(p)$: fonction de transfert du module d'adaptation qui traduit la consigne
- K_A : gain permettant de générer un signal comparable à celui de la mesure
- $C(p)$: fonction de transfert du correcteur du module de commande
- K_U : gain du convertisseur numérique analogique (CNA)
- K_D : gain du servo-distributeur hydraulique
- K_C : gain du capteur de position de la tige du vérin (CAN)
- $H_V(p)$: fonction de transfert du vérin hydraulique
- $H_M(p)$: fonction de transfert du mécanisme d'ouverture

Le mécanisme d'ouverture est illustré sur le DT5. Il est constitué d'un anneau de 7,5 mètres de diamètre, qui entoure la conduite et qui permet d'incliner simultanément les 24 pales directrices, à l'aide d'un embiellage. Deux vérins permettent d'actionner ce mécanisme (1 seul est visible sur l'illustration) en poussant l'anneau, pour le faire tourner autour de l'axe de la conduite. Les commandes sont spécifiques à chacun des deux vérins, mais synchronisées et asservies en position. Ainsi, les deux vérins sont supposés agir de façon parfaitement symétrique et simultanée, et une seule boucle d'asservissement permet de modéliser le comportement du système.

Le vérin est piloté par un servo-distributeur à commande électrique.

Un capteur magnétostrictif est intégré dans le corps du vérin et mesure la position relative de la tige. Il renvoie la valeur numérique $N_X(p)$ associée.

Le module d'adaptation traduit linéairement la consigne $V_{\%C}(p)$ en une consigne de déplacement du vérin, notée « $X_c(p)$ » avec la règle : $0 \% = 0 \rightarrow 0 \text{ m}$ lorsque la tige est rentrée et $100 \% = 1 \rightarrow 1 \text{ m}$ lorsque la tige est en bout de course.

III.2.1 Modélisation du mécanisme d'ouverture

Lorsqu'il est mis en mouvement, le vérin fait pivoter l'anneau, qui entraîne 24 bielles, qui tirent sur 24 leviers, qui obligent les 24 pales directrices à s'incliner.

L'évolution de l'inclinaison des pales directrices est proportionnelle à l'évolution de la sortie de tige du vérin,

Pour cette modélisation, les appellations et valeurs suivantes seront utilisées :

- $X_M = 1 \text{ m}$: désigne le déplacement maximal de la tige du vérin (sa course) ;
- $\delta_M = 90^\circ$: désigne l'angle de rotation des pales directrices, pour passer la conduite de l'état fermé ($V_{\%}(p) = 0 \% = 0$) à l'état ouvert ($V_{\%}(p) = 100 \% = 1$).

Q23. Exprimer puis calculer la valeur du gain K_M en m^{-1} à affecter au bloc du mécanisme d'ouverture pour en modéliser son comportement linéaire.

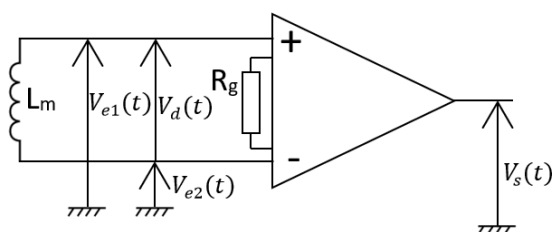
III.2.2 Modélisation du capteur magnétostrictif

Le fonctionnement du capteur est décrit sur le DT9.

Le corps du capteur est fixé au corps du vérin, et la tige du capteur (guide d'ondes ferromagnétique) passe à l'intérieur de la tige du vérin, sur laquelle est fixé l'aimant.

Afin de déterminer le temps de propagation de l'onde, il est indispensable de traiter la tension obtenue par l'inductance de mesure notée L_m . Cette tension différentielle est de l'ordre du millivolt et doit dans un premier temps être amplifiée avant de faire l'objet d'un traitement numérique. En plus de cette tension différentielle notée $V_d(t)$, les tensions $V_{e1}(t)$ et $V_{e2}(t)$ peuvent contenir une tension de mode commun, notée $V_c(t)$, due aux perturbations.

L'amplificateur utilisé ici, est un amplificateur d'instrumentation à trois amplificateurs linéaires intégrés (ALI), dont la structure classique est donnée figure 14. Il présente de nombreux avantages technologiques en comparaison d'une structure d'amplification différentielle à un seul ALI. Entre autres, l'impédance d'entrée est très grande et le gain d'amplification est facilement réglable par l'ajout d'une résistance extérieure, notée R_g .



$$V_{e1}(t) = V_c(t) + \frac{V_d(t)}{2}$$

$$V_{e2}(t) = V_c(t) - \frac{V_d(t)}{2}$$

Figure 13 – Schéma de principe de l'amplification de la tension induite par l'onde

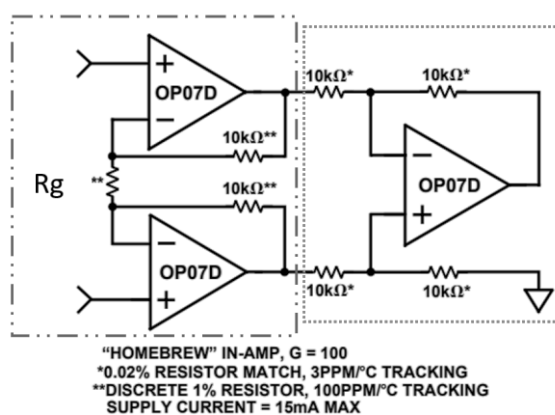


Figure 14 – Schéma de principe de l'amplificateur à trois ALI

Le premier étage (figure 15) de cet amplificateur, permet de réaliser une amplification de la tension différentielle alors que le deuxième étage (figure 16) permet de supprimer la tension de mode commun.

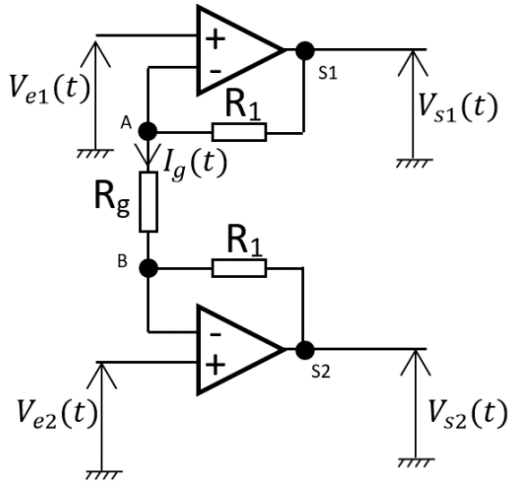


Figure 15 – Premier étage d'une structure d'amplification à trois ALI

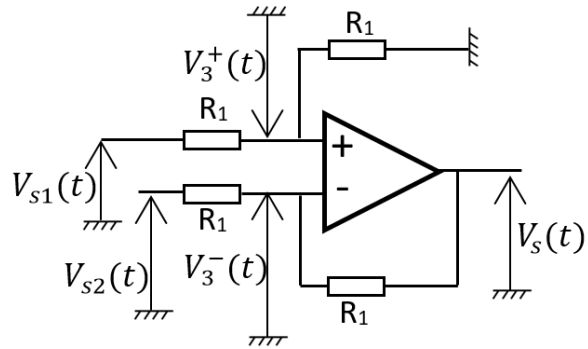
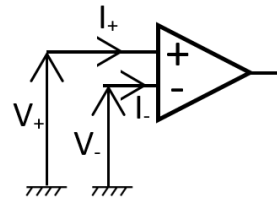


Figure 16 – Deuxième étage dit « étage différentiel »

Hypothèses et notations :

- les ALI sont idéaux :
 - $I_+ = I_- = 0$
 - $V_+ = V_-$
- les deux ALI fonctionnent en mode linéaire grâce à la rétroaction sur la borne moins.



Dans le premier étage, une étude théorique permet d'exprimer les tensions $V_{s1}(t)$ et $V_{s2}(t)$ sous la forme suivante :

$$V_{s1}(t) = G_{MC} \cdot V_c(t) + G_d \cdot \frac{V_d(t)}{2}$$

$$V_{s2}(t) = G_{MC} \cdot V_c(t) - G_d \cdot \frac{V_d(t)}{2}$$

Avec $G_{MC} = 1$ et $G_d = \frac{2 \cdot R_1 + R_g}{R_g}$

Q24. En déduire l'impact de cette structure sur la tension commune $V_c(t)$ et la tension différentielle $V_d(t)$. Déterminer la valeur de R_g pour obtenir un gain différentiel G_d de 1000 avec une résistance R_1 de 10 kΩ.

Dans le cas idéal, l'étage différentiel de la structure permet de supprimer la tension de mode commun, mais les différentes imperfections du système ne permettent en réalité que de diminuer cette tension.

Dans la suite du sujet, seule l'imperfection de l'ALI sera étudiée et la relation suivante sera admise :

$$V_s(t) = A_d \cdot (V_3^+(t) - V_3^-(t)) + A_{MC} \cdot \left(\frac{V_3^+(t) + V_3^-(t)}{2} \right) \quad (i)$$

Avec A_d le gain différentiel et A_{MC} le gain de mode commun.

Q25. Exprimer $V_3^+(t)$ en fonction de $V_{s1}(t)$ puis $V_3^-(t)$ en fonction de $V_{s2}(t)$ et $V_s(t)$.

Q26. À partir de la relation (i) précédente, montrer que l'expression de $V_s(t)$ peut s'écrire en fonction de $V_{s1}(t)$ et de $V_{s2}(t)$ sous la forme ci-dessous. Puis proposer une forme simplifiée des coefficients K_1 et K_2 dans l'hypothèse où $A_d \gg 1$ et $A_d \gg A_{MC}$.

$$V_s(t) = K_1 \cdot (V_{s1}(t) - V_{s2}(t)) + K_2 \cdot \left(\frac{V_{s1}(t) + V_{s2}(t)}{2} \right)$$

Avec

$$K_1 = \frac{A_d}{2 \cdot \left(1 + \frac{A_d}{2} + \frac{A_{MC}}{4} \right)} \quad K_2 = \frac{A_{MC}}{2 \cdot \left(1 + \frac{A_d}{2} + \frac{A_{MC}}{4} \right)}$$

Q27. Exprimer $V_s(t)$ en fonction de $V_c(t)$ et $V_d(t)$ et des différents gains K_1, K_2, G_d et G_{MC} , puis déterminer les expressions de G_{dt} et G_{MCT} pour mettre cette relation sous la forme suivante : $V_s(t) = G_{dt} \cdot (V_d(t) + G_{MCT} \cdot V_c(t))$
Conclure sur l'intérêt de cette amplification au regard de l'influence de $V_c(t)$ sur $V_s(t)$.

Une fois cette tension amplifiée, un circuit logique non étudié ici, permet de mesurer le temps de propagation de l'onde ultrasonique et d'en déduire l'évolution de la position du vérin $X(p)$ entre deux impulsions $N_X(p)$ émises par le capteur.

Q28. En tenant compte de la résolution du capteur (DT9), donner la valeur numérique de son gain K_C .
Sachant que la valeur maximale de déplacement du vérin est $X_M = 1 m$, combien d'octet sont nécessaires pour coder cette information ?

Le capteur communique la position de la tige de vérin à un automate programmable situé dans le centre de pilotage, via un serveur Ethernet et selon le protocole Modbus TCP/IP (IPV4), décrit dans le DT10. Un exemple des trames échangées entre l'automate et le capteur à un instant donné, est donné ci-dessous :

Trame de demande

```
45 00 00 34 5e 0d 40 00      80 06 1a e4 c0 a8 00 2a
c0 a8 00 58 c3 4b 01 f6      d6 89 01 a6 d9 e8 a3 ba
50 18 fa e5 f1 e1 00 00      f3 db 00 00 00 06 ff 03
48 2e 00 01
```

Trame de réponse

```
45 00 00 33 00 0e 40 00      80 06 78 e4 c0 a8 00 58
c0 a8 00 2a 01 f6 c3 4b      d9 e8 a3 ba d6 89 01 b2
50 18 08 00 b9 e9 00 00      f3 db 00 00 00 06 ff 03
03 01 d4 c0
```

Figure 17 – Trames MODBUS TCP/IP (en-tête Ethernet et CRC non affichés)

Q29. Quelle est la position de la tige du vérin indiquée par le capteur à cet instant ?

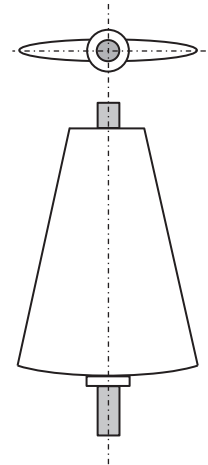
III.2.3 Modélisation du vérin

Il s'agit ici de proposer un modèle du comportement dynamique du vérin, qui tient compte de la compressibilité du fluide (huile de synthèse) qui l'alimente avec le débit volumique $q(t)$ commandé par le servo distributeur.

La surface des pales directrices qui est au contact de l'eau, a une forme de trapèze symétrique, dont l'axe est commun aux axes des portées cylindriques (grisées sur le schéma ci-contre) qui participent au guidage des pales par liaison pivot avec la conduite.

De ce fait, l'action mécanique exercée par l'eau sur les pales est supposée proportionnelle à leur vitesse de rotation dans l'eau et nulle lorsque les pales sont inclinées dans une position donnée à l'arrêt.

Cette action mécanique a pour conséquences d'engendrer un effort résistif $f_R(t)$ sur la tige du vérin, qui s'oppose à son déplacement et qui est proportionnel à sa vitesse relative au corps du vérin.



Les lois fondamentales de mécanique des fluides et de mécanique des solides appliquées au vérin, sont données ci-dessous et aboutissent à la modélisation par schéma-bloc suivante :

$$q(t) = S \frac{d x(t)}{dt} + \frac{V_0}{B} \frac{d p_V(t)}{dt}$$

$$M_{eq} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = f_V(t) - f_R(t)$$

$$f_V(t) = S p_V(t)$$

$$f_R(t) = K_R \frac{d x(t)}{dt}$$

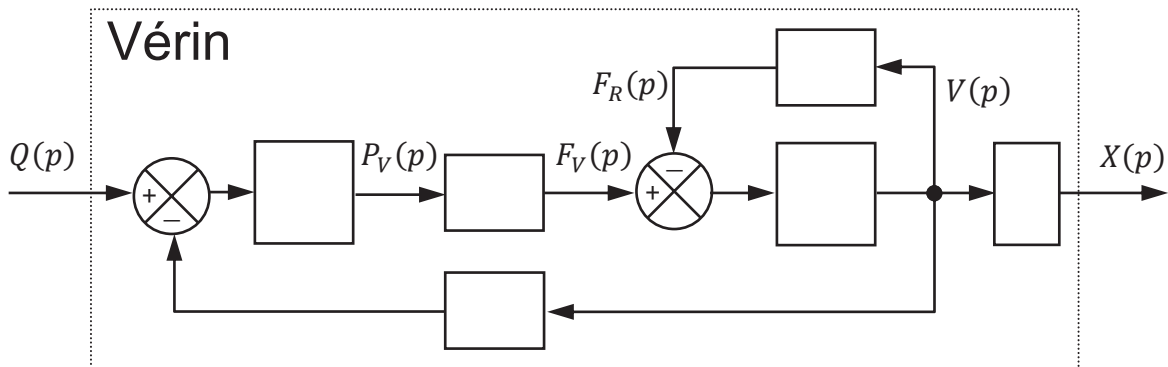


Figure 18 – Schéma bloc incomplet du vérin hydraulique

$Q(p)$: débit volumique du fluide de commande du vérin

$P_V(p)$: pression de fluide utile à l'intérieur du vérin

$F_V(p)$: force utile développée par la tige du vérin

$F_R(p)$: force résistive du mécanisme d'ouverture

$V(p)$: vitesse de la tige par rapport au corps du vérin

$X(p)$: position de la tige par rapport au corps du vérin

B : coefficient de compressibilité du fluide qui alimente le vérin

V_0 : volume de fluide contenu dans la chambre motrice du vérin (supposé égal au demi volume du vérin pour simplifier)

S : section utile du vérin en sortie de tige (= surface du piston)

M_{eq} : masse équivalente de l'ensemble des solides du mécanisme d'ouverture de vannage déplacés par la tige du vérin, calculée par une étude énergétique ramenée à la tige du vérin

K_R : coefficient obtenu par une étude de l'action de l'eau sur les pales

Les valeurs des caractéristiques précédentes sont données ci-dessous :

$$B = 15000 \text{ bars}, V_0 = 0,04 \text{ m}^3, S = 0,08 \text{ m}^2, M_{eq} = 1,5 \text{ tonnes et } K_R = 4 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$$

Q30. À partir des équations précédentes, compléter le schéma-bloc sur le DR5, puis exprimer la fonction de transfert du vérin $H_V(p)$ en précisant l'ordre n et la classe α de celle-ci, ainsi que les expressions de son gain K_V et de ses autres coefficients caractéristiques (selon l'ordre n).
Calculer leurs valeurs numériques.

III.2.4 Modélisation du servo-distributeur

La fonction de distribution de l'énergie est assurée par un servo-distributeur dont les caractéristiques principales sont données dans le DT11.

Q31. Sachant que la tige de vérin doit pouvoir atteindre la vitesse maximale de déplacement $v_{Max} = 15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, justifier pourquoi le servo-distributeur utilisé sur le système étudié, est un modèle de la série D680 capable de débiter un débit maximal $Q(100\%) = Q_{max} = 80 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$.
En déduire la valeur numérique du gain K_D qui modélise le comportement du servo-distributeur.

III.2.5 Modélisation du module d'adaptation

La précision de régulation de vitesse de l'alternateur implique que l'asservissement de vannage ne doit générer aucune erreur statique e_S en réponse à une consigne d'ouverture de la conduite en échelon $v_{\%C}(t)$ d'amplitude constante A .
Cette consigne et cette erreur sont définies avec la fonction $u(t)$ de Heaviside par les relations suivantes :

$$v_{\%C}(t) = A u(t) \xrightarrow{L} V_{\%C}(p) = \frac{A}{p} \quad \text{et} \quad e_S = \lim_{t \rightarrow \infty} (v_{\%C}(t) - v_{\%}(t))$$

Pour que le système décrit sur la figure 12 soit correctement asservi, il faut que l'écart $\varepsilon(p)$ en sortie de comparateur s'annule, lorsque la réponse atteint la valeur de la consigne en régime permanent :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t) = 0, \quad \text{lorsque : } e_S = 0$$

Q32. En l'absence de correction ($C(p) = 1$), quelles sont les expressions des modèles $H_A(p)$ et K_A qu'il faut imposer aux blocs du module d'adaptation, pour que l'asservissement de vannage puisse respecter l'exigence de précision ? Justifier.

III.3 Performances de l'asservissement de vannage

Le module d'adaptation de la figure 12 a été réglé en fonction des autres composants de l'asservissement de vannage, afin d'obtenir les meilleures performances possibles. Ainsi, ces performances dépendent uniquement de l'asservissement en position du vérin, dont le comportement se modélise désormais par la figure 19.

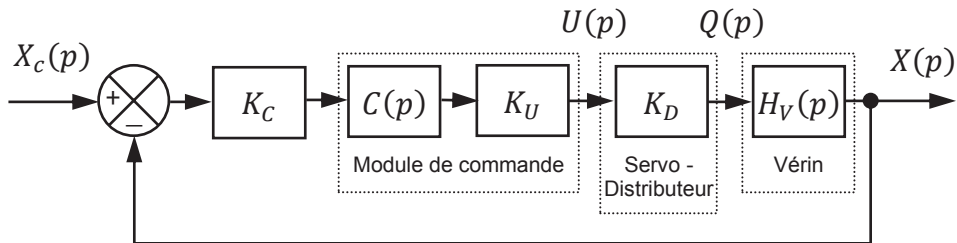


Figure 19 – Schéma bloc simplifié de l'asservissement en position du vérin de vannage

Une série d'essais a été réalisée sur site, avec plusieurs consignes harmoniques imposant un régime forcé au système non corrigé : $C(p) = 1$.

Ces essais ont permis de valider le modèle de comportement dynamique théorique de cette boucle d'asservissement (modèle étudié précédemment en partie III.2).

Le DR5 donne les diagrammes de Bode de la fonction de transfert en boucle ouverte non corrigée $H_{BO}(p)$ correspondant à ces essais.

Q33. Par analyse graphique sur le DR5, identifier l'expression de $H_{BO}(p)$ et préciser l'ordre « n » et la classe « α » de celle-ci. Identifier graphiquement la valeur de son gain nommé K_{BO} ainsi que les valeurs de ses autres coefficients caractéristiques (selon l'ordre « n »).

Un extrait du cahier des charges relatif à cet asservissement de vannage est donné ci-dessous :

Exigence	Critères d'appréciation	Niveau
Vannage :	Rapidité Temps de réponse à 5 %	4 s
Faire varier la section de la conduite.	Précision Erreur statique de position Erreur statique de trainage	0 mm, pour une consigne de 100 mm 1 mm, pour une consigne de 15 mm · s ⁻¹
	Stabilité Marges de stabilité	Marge de gain $M_{GdB} \geq 20$ dB Marge de phase $M_{\varphi} \geq 45^\circ$

Figure 20 – Extrait du cahier des charges relatif à l'asservissement de vannage

Q34. Par méthode graphique sur DR5, en supposant $C(p) = K_p \neq 1$, calculer la valeur K_{pmax} de K_p qui permet de répondre aux exigences de stabilité du cahier des charges. Puis calculer la valeur K_{pmin} de K_p qui permet de répondre aux exigences de précision.

Conclure sur les performances de l'asservissement de vannage avec une correction proportionnelle.

Q35. Finalement, en se basant sur le modèle de la figure 9, expliquer pourquoi un correcteur PID est utilisé dans l'asservissement de régulation de fréquence.

IV. ÉTUDE DYNAMIQUE DE LA TURBINE

Objectif : Modéliser les actions mécaniques transmises entre l'eau, la turbine et le bulbe (bâti), dans des conditions d'utilisations critiques telles qu'un emballement ou un délestage, afin de planifier le calendrier des phases de maintenance.

IV.1 Couple fourni à la génératrice

La turbine est principalement constituée de 4 pales motrices orientables par rapport à l'ogive du rotor. Un modèle simplifié plan est donné sur la figure 21. L'ensemble rotor est guidé en rotation par rapport au bulbe autour de l'axe (O, \vec{z}_0) . Dans cette partie, la position du cercle de vannage permet de considérer que l'axe de rotation du rotor est colinéaire à la vitesse de l'eau s'écoulant dans la conduite définie par :

$$\vec{V}_{\text{eau/bulbe}} = -V_e \vec{z}_0 \text{ avec } V_e = 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

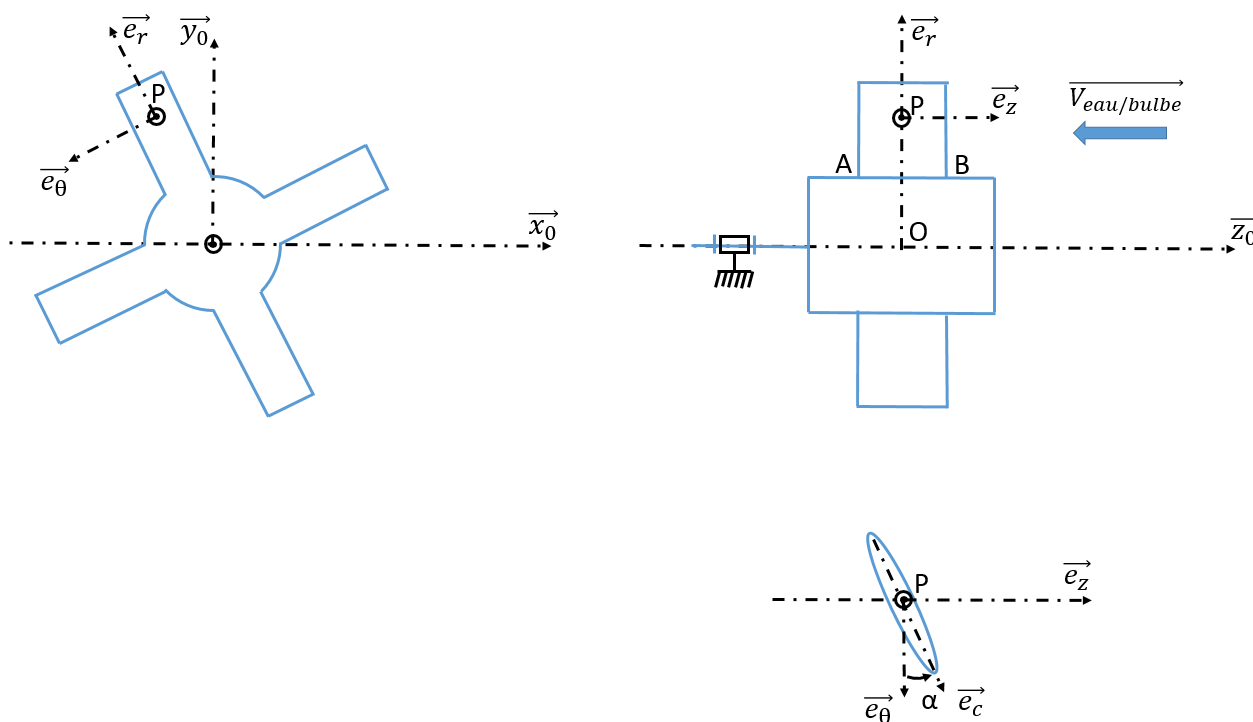


Figure 21 – Modélisation plane simplifiée de la turbine

Hypothèses et notations :

- au bulbe fixé au bâti noté (0), est associé le repère $R_0 (O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$. Le référentiel associé à ce repère est supposé galiléen dans cette étude avec \vec{y}_0 vertical ascendant ;
- l'angle de rotation de la turbine (1) par rapport au bulbe (0) est défini par $\theta = (\vec{x}_0, \vec{e}_r) = (\vec{y}_0, \vec{e}_\theta)$;
- la position du cercle de vannage permet de considérer que la vitesse angulaire de la turbine par rapport au bulbe, notée $\overline{\Omega}_{1/0} = \dot{\theta} \vec{z}_0 = \omega \vec{z}_0$, est constante et égale à $83,3 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$;
- une base orthonormée directe $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_z)$ est associée à une pale (2) ;

- la position d'un point P sur la pale (2) est définie par $\overrightarrow{OP} = r\overrightarrow{e}_r$ avec $r_{max} = 3,046 \text{ m}$;
- la direction de la corde de référence de la pale (2) est définie par la direction \overrightarrow{e}_c ;
- le plan moyen de la pale (2) est défini par $(P, \overrightarrow{e}_r, \overrightarrow{e}_c)$;
- l'angle de calage entre la direction de la pale (2) et la direction de la vitesse du point P par rapport au bulbe (0), lors de la rotation de la turbine (1) est noté $\alpha = (\overrightarrow{e}_\theta, \overrightarrow{e}_c)$;
- l'angle d'incidence entre la direction de la corde et la direction de la vitesse apparente de l'eau par rapport à la pale est noté $\beta = (\overrightarrow{e}_c, \overrightarrow{V_{P,2/eau}})$.

Q36. Donner l'expression littérale de la vitesse du point P appartenant à la pale par rapport à l'eau notée $\overrightarrow{V_{P,2/eau}}$ en fonction de r , ω , et V_e dans la base $(\overrightarrow{e}_r, \overrightarrow{e}_\theta, \overrightarrow{e}_z)$. Effectuer l'application numérique pour la valeur maximale de r .

Q37. Tracer sur le DR4 le vecteur $\overrightarrow{V_{P,2/eau}}$ en définissant une échelle de représentation graphique pour les vitesses obtenues à la question précédente. Préciser les angles α et β .

Q38. Exprimer littéralement $\tan(\alpha + \beta)$ en fonction de r , ω , et V_e .

L'eau exerce une force élémentaire en chaque point de la surface de la pale, notée $\overrightarrow{dF_{eau \rightarrow 2}}$ = $\overrightarrow{dP_{eau \rightarrow 2}} + \overrightarrow{dT_{eau \rightarrow 2}}$ avec :

- $\overrightarrow{dP_{eau \rightarrow 2}}$: la portance élémentaire avec $\|\overrightarrow{dP_{eau \rightarrow 2}}\| = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot dS \cdot C_z \cdot \|\overrightarrow{V_{2/eau}}\|^2$
- $\overrightarrow{dT_{eau \rightarrow 2}}$: la traînée élémentaire avec $\|\overrightarrow{dT_{eau \rightarrow 2}}\| = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot dS \cdot C_x \cdot \|\overrightarrow{V_{2/eau}}\|^2$

Où :

- ρ : masse volumique de l'eau ;
- dS : élément de surface de la pale ;
- C_z : coefficient de portance ;
- C_x : coefficient de traînée.

Q39. Préciser les directions des vecteurs portance élémentaire $\overrightarrow{dP_{eau \rightarrow 2}}$ et traînée élémentaire $\overrightarrow{dT_{eau \rightarrow 2}}$. Tracer ces deux vecteurs au point P sur l'élément de pale du DR4 (une longueur arbitraire sera donnée aux 2 vecteurs).

Q40. Déterminer l'expression littérale du moment élémentaire de la force exercée par l'eau sur l'élément de pale, notée $\overrightarrow{dM_{O,eau \rightarrow 2}} \cdot \overrightarrow{z}_0$, par rapport à l'axe de rotation $(O, \overrightarrow{z}_0)$.

Q41. En analysant l'expression obtenue précédemment et en observant la géométrie des pales de la turbine sur le DT5, donner la solution constructive réalisée pour la forme des pales sur toute leur longueur dans la direction du vecteur \overrightarrow{AB} pour que le moment élémentaire déterminé précédemment soit constant le long de la pale. Justifier votre réponse.

IV.2 Dispositif de freinage en cas d'emballement

L'alternateur est en prise directe avec le rotor de la turbine (1), et son freinage mécanique est assuré par le frottement d'une piste en acier, solidaire du rotor, sur 4 garnitures de freinage équiréparties sur la piste de freinage. Lors de l'utilisation du système de freinage, les forces de frottement entre la piste et les garnitures doivent permettre d'assurer l'arrêt du rotor de la turbine en cas d'emballement. La vitesse d'emballement de la turbine est notée N_{emb} et sa valeur est $N_{emb} = 314 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$.

Le couple disponible au niveau de la turbine est noté C_T et sa valeur est $C_T = 80 \cdot 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$. Le couple dû aux pertes de l'alternateur, noté C_a se compose des pertes par frottements dans les paliers, et des pertes par ventilation.

Ce couple est estimé à une valeur $C_a = 8 \cdot 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$. Les autres liaisons sont considérées parfaites.

L'inertie équivalente de l'ensemble mobile ramenée sur l'axe de rotation de l'alternateur est notée J_{eq} et sa valeur est $J_{eq} = 8 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

Q42. Déterminer l'expression littérale de la décélération angulaire, notée $\Gamma_{1/0}$, supposée constante, pour passer de la vitesse d'emballement de la turbine N_{emb} à une vitesse nulle. Effectuer l'application numérique en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$.

Q43. Déterminer l'expression littérale du couple de freinage C_f , supposé constant, à appliquer sur l'alternateur pour le stopper en moins de 180 s en fonction de C_T , C_a , J_{eq} et $\Gamma_{1/0}$. Préciser la méthode utilisée. Effectuer l'application numérique.

Le principe du système de freinage est présenté sur la figure 22. Pour chacune des 4 paires de patins, il est équipé de deux pistons coaxiaux. La zone de frottement de chaque patin a une forme circulaire et un diamètre $d_p = 0,8 \text{ m}$.

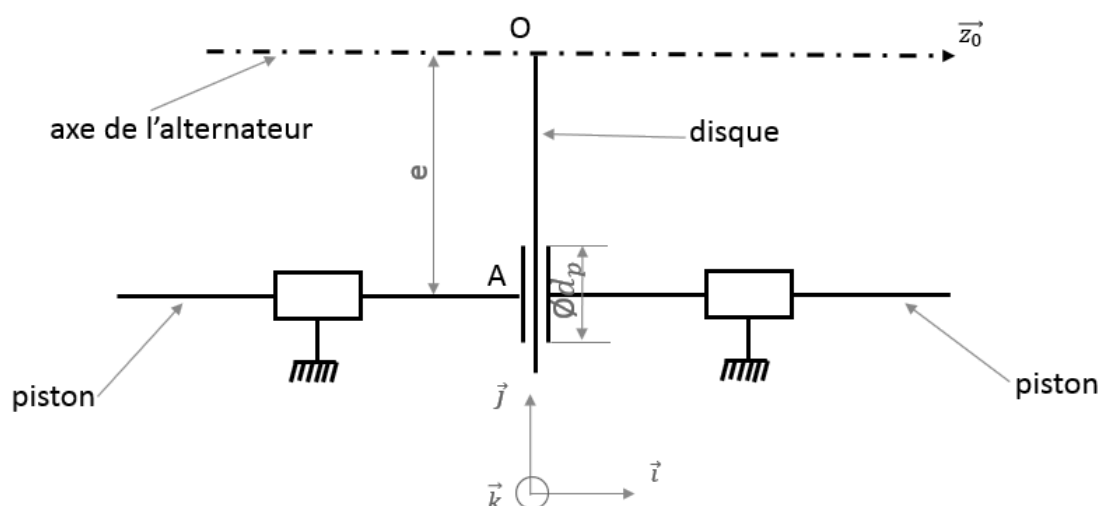


Figure 22 – Modélisation du système de freinage

L'air sous pression pousse les patins dans la direction $\pm \vec{i}$ et les amène en contact avec la piste en acier, ce qui entraîne le freinage de l'alternateur. Le coefficient de frottement est $f = 0,5$. La distance entre l'axe des pistons des 4 patins et l'axe de rotation de l'alternateur est $e = 2 \text{ m}$.

Les actions mécaniques exercées par les patins des garnitures sur la piste en acier sont supposées être des glisseurs appliqués en A (point d'intersection entre l'axe des pistons et le disque). L'alternateur tourne dans le sens trigonométrique. La pression de contact, supposée constante, entre la piste en acier et les patins est notée P_{ap} .

Q44. Donner l'expression littérale du torseur des actions mécaniques de l'ensemble des 2 pistons sur le disque en fonction de P_{ap} , d_p et f au point A.

Q45. En détaillant votre démarche, déterminer l'expression littérale de la pression P_{ap} pour stopper l'alternateur en moins de 180 s.

Q46. Le système est équipé d'un groupe pneumatique de pression maximale 7 bars. L'exigence associée à l'arrêt d'urgence est-elle vérifiée ?

IV.3 Étude des paliers hydrodynamiques

Le guidage en rotation de l'ensemble formé par la turbine et l'alternateur est en partie réalisé par des paliers hydrodynamiques, qui favorisent la réduction des frictions et la stabilité de l'ensemble tournant.

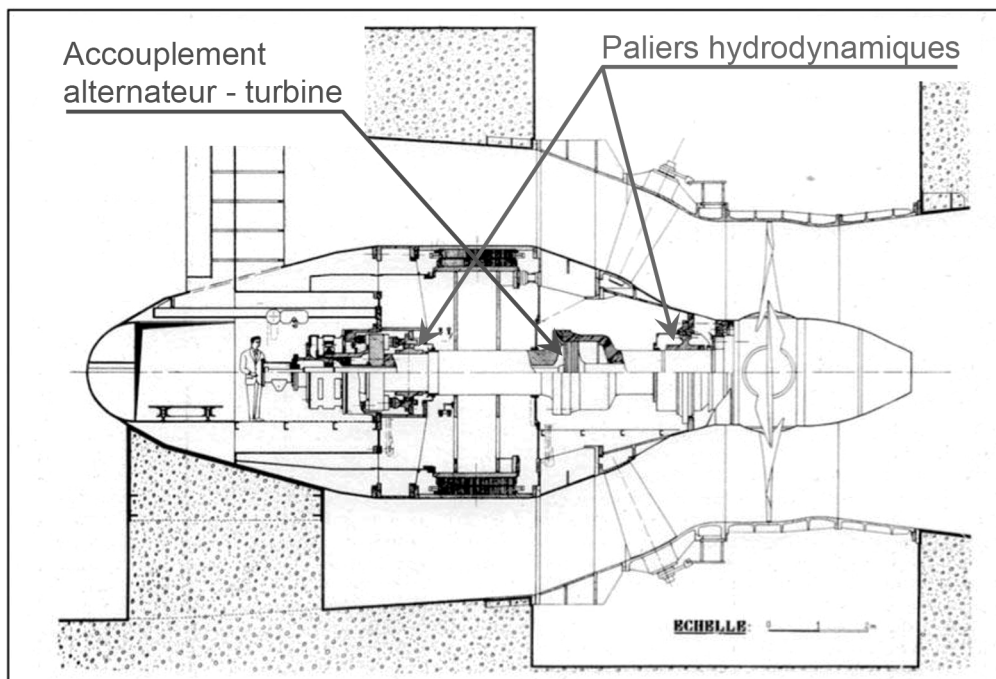


Figure 23 – Vue en coupe de la turbine

Le principe de fonctionnement des paliers hydrodynamiques repose sur la lubrification hydrodynamique, où un film d'huile est créé entre la surface du palier et l'arbre en rotation.

En effet, la rotation de l'arbre entraîne le lubrifiant, générant ainsi une force centrifuge qui pousse celui-ci vers l'extérieur, créant une pression plus élevée sur les bords du palier. Cette pression accrue provoque la formation d'un film d'huile plus épais entre l'arbre et le palier.

Ce film d'huile forme une barrière qui réduit considérablement le frottement et l'usure.

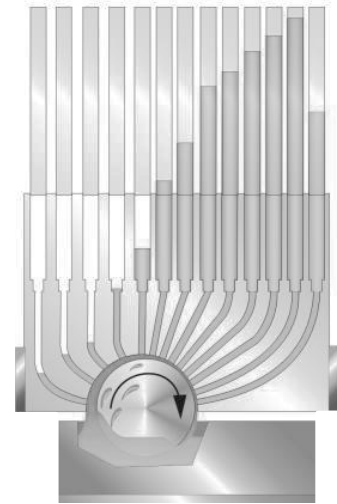


Figure 24 – Observation expérimentale de l'évolution de la pression hydrodynamique

La stabilité du film d'huile est cruciale, elle nécessite le maintien d'une épaisseur minimale du film dans les conditions de fonctionnement attendues.

Q47. Citer deux paramètres qui peuvent influencer sur l'épaisseur du film d'huile.

IV.3.1 Étude de la phase statique, turbine à l'arrêt

Lorsque la turbine est à l'arrêt, les deux paliers – notés (2) et (3) – prévus pour son guidage en rotation doivent pouvoir supporter cette charge statique : le constructeur du coussinet indique une pression de contact maximale à ne pas dépasser de 10 MPa, notamment pour ne pas détériorer l'état de surface du palier en phase de démarrage.

Conventions d'écriture et hypothèses de la partie IV.3

Au bâti noté (0) est associé le référentiel $(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ supposé galiléen avec \vec{y}_0 vertical ascendant.

A l'ensemble tournant noté (1) = (rotor turbine + rotor alternateur) est associé le référentiel $(G_1, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$ avec :

- $\theta = (\vec{x}_0, \vec{x}_1) = (\vec{y}_0, \vec{y}_1)$
- G_1 le centre de gravité de l'ensemble tournant (1)
- $m_1 = 1,58 \cdot 10^5 \text{ kg}$ la masse de l'ensemble tournant (1)

Les 2 paliers hydrodynamiques (figure 25) sont notés (2) et (3) avec :

- A, B leurs centres respectifs
- $\vec{AB} = 2L \vec{z}_0$ l'axe de rotation 1/0
- $r = 450 \text{ mm}$ le rayon intérieur des paliers hydrodynamiques
- $l = 900 \text{ mm}$ la longueur des paliers hydrodynamiques

Au niveau des surfaces de contact entre les paliers et l'ensemble tournant, la répartition de pression pouvant être supposée uniforme, les torseurs des actions transmissibles peuvent être modélisés par les glisseurs suivants :

$$T(2 \rightarrow 1) = \begin{cases} \vec{R}_A = X_{21} \cdot \vec{x}_1 + Y_{21} \cdot \vec{y}_1 \\ \vec{0} \end{cases} \quad T(3 \rightarrow 1) = \begin{cases} \vec{R}_B = X_{31} \cdot \vec{x}_1 + Y_{31} \cdot \vec{y}_1 \\ \vec{0} \end{cases}$$

Dans cette étude, la résultante des actions mécaniques de l'eau sur l'ensemble tournant (1) ne sera pas prise en compte, sa composante axiale suivant \vec{z}_1 étant transmise au bâti par l'intermédiaire d'une butée hydrodynamique non étudiée.

De plus, l'étude se faisant à vitesse constante, les moments des actions de l'eau et de l'alternateur sur (1) suivant l'axe de rotation ne seront pas pris en compte.

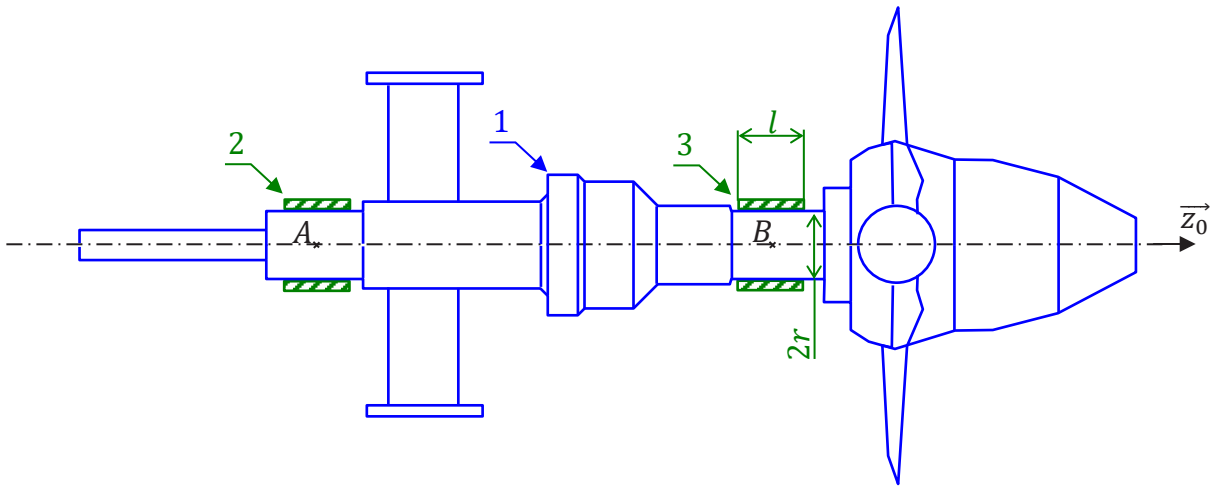


Figure 25 – Positionnement des paliers hydrodynamiques (2) et (3)

Q48. Donner, sans la justifier, la condition à vérifier pour que la charge statique due à l'action de pesanteur soit uniformément répartie entre les 2 paliers hydrodynamiques.

Le jeu présent dans les paliers hydrodynamiques permet de supposer qu'à l'arrêt la surface de contact entre l'arbre et l'alésage peut être modélisée par un demi-cylindre de diamètre $2r$ et de longueur l (figure 26).

La répartition de pression est supposée constante et identique sur les 2 paliers.

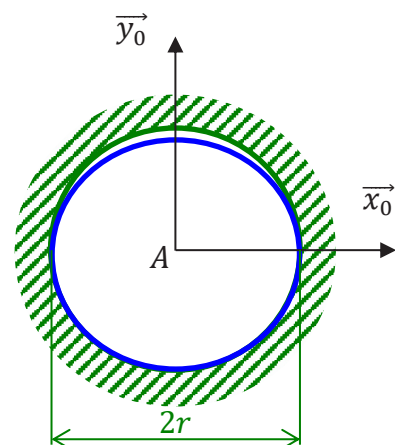


Figure 26 – Surface de contact statique

Q49. Vérifier que la pression statique admissible, spécifiée par le constructeur des paliers, n'est pas dépassée. La modélisation retenue et le calcul réalisé seront justifiés.

IV.3.2 Étude du débit de fuite en fonctionnement normal

A vitesse nominale, l'objectif est d'avoir un point de fonctionnement proche du point critique comme le montre la courbe de Stribeck (figure 27). Cette courbe donne l'évolution du coefficient de frottement en fonction de la variable de Sommerfeld χ définie par :

$$\chi = \frac{\mu \omega}{p} \left(\frac{r}{a} \right)^2$$

Avec en fonctionnement normal :

$\mu = 0,05$	la viscosité dynamique de l'huile en Pa·s
$N = 83$	la vitesse de rotation en tr·min ⁻¹
$p = 10^6$	la pression statique en Pa
$r = 0,45$	le rayon du palier en m
$a = 4 \cdot 10^{-4}$	le jeu radial dans le palier en m

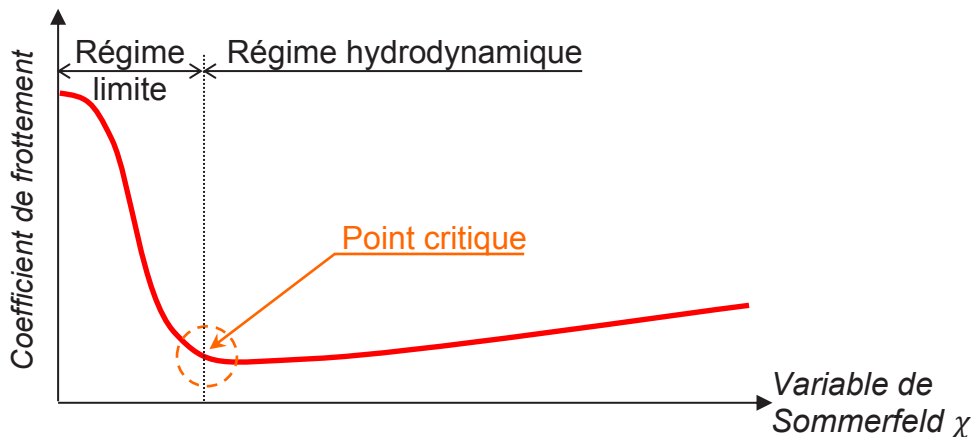


Figure 27 – Courbe de Stribeck

Au cours du fonctionnement, de l'huile est injectée en permanence dans les paliers pour compenser les débits de fuite sur les surfaces latérales (figure 28). Pour chacun des deux paliers, le constructeur de la turbine a prévu un débit d'huile de 1,25 dm³·s⁻¹

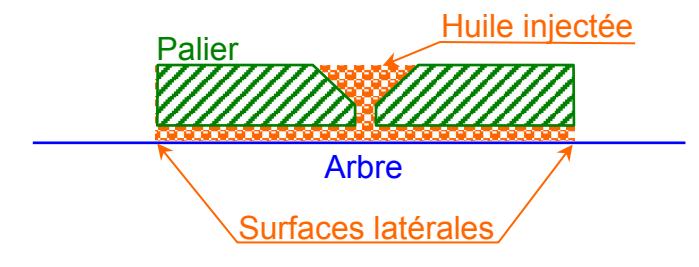


Figure 28 – Surfaces latérales de fuite

Q50. À l'aide de l'abaque fourni DT12, déterminer le débit de fuite d'un palier et confronter ce résultat à la valeur prévue par le constructeur.

IV.3.3 Étude des effets des déformations de l'ensemble tournant (1) sur l'épaisseur du film d'huile dans les paliers hydrodynamiques

En fonctionnement normal, des variations importantes de la puissance électrique produite peuvent provoquer de légères déformations de l'ensemble tournant constitué des rotors de l'alternateur et de la turbine.

Ces petites déformations, au regard des caractéristiques inertielles de la turbine étudiée, peuvent avoir des conséquences sur le fonctionnement des paliers, et notamment sur l'épaisseur du film d'huile.

Les déformations de (1) prises en compte sont supposées ne pas impacter les 2 zones de guidage au niveau des paliers. Dans ce contexte, la modélisation retenue (figure 29) est celle d'un rotor assimilé à un cylindre dont l'axe de révolution (G_1, \vec{z}) fait un angle ε avec l'axe de rotation (G_1, \vec{z}_0). Cet angle ε est supposé constant, positif et très petit.

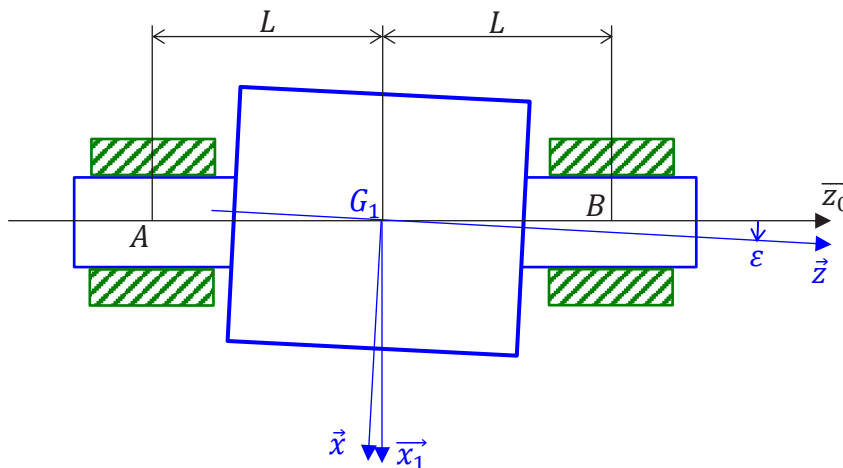


Figure 29 – Modélisation de la rotation de (1)

Définition des repères :

$R_0(G_1, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ supposé galiléen avec \vec{y}_0 vertical ascendant

$R_1(G_1, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$ lié à (1) avec $\theta = (\vec{x}_0, \vec{x}_1) = (\vec{y}_0, \vec{y}_1)$ et $\ddot{\theta} = 0$

$R(G_1, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ repère principal d'inertie du rotor avec $\varepsilon = (\vec{x}_1, \vec{x}) = (\vec{z}_0, \vec{z})$

L'inertie de (1) est supposée limitée à celle du cylindre central d'axe (G_1, \vec{z}) – car les moments d'inertie des portées cylindriques du rotor au niveau des paliers sont négligés – la matrice d'inertie est donnée par :

$$I_{G_1}(1) = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 \\ 0 & A_1 & 0 \\ 0 & 0 & C_1 \end{bmatrix}_{(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})} \quad \text{avec } A_1 > C_1$$

Q51. Justifier la forme de la matrice d'inertie et préciser si les conditions d'équilibrage sont vérifiées. Conclure.

Q52. Déterminer l'expression du moment dynamique de (1) au point G_1 , noté $\overline{\delta(G_1, 1/0)}$, exprimé dans la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$. Linéariser son expression à l'ordre 1 en supposant ε très petit.

Q53. Montrer que le glisseur \vec{R}_A peut s'écrire sous la forme $\vec{R}_A = F_0 \cdot \vec{y}_0 + F_1 \cdot \vec{y}_1$ où F_0 et F_1 sont deux constantes à déterminer en fonction de $m_1, g, L, \theta, A_1, C_1$ et ε .

Q54. Déterminer la valeur de $\dot{\theta}$ pour laquelle $F_1 = F_0$. Cette valeur sera notée ω_{lim} .

L'étude de la direction du glisseur \vec{R}_A permet d'analyser les zones où l'épaisseur du film d'huile risque d'être la moins importante :

- pour identifier la zone du palier sur laquelle la charge va s'appliquer, il faut représenter le vecteur $-\vec{R}_A$ dans le repère R_0 ;
- pour identifier la zone du rotor sur laquelle la charge va s'appliquer, il faut représenter le vecteur $+\vec{R}_A$ dans le repère R_1 .

Le schéma de la figure 30 montre que, pour $\dot{\theta} < \omega_{lim}$, la zone d'épaisseur potentiellement trop faible se situera sur une partie de la circonférence du palier entre les points M_0 et M_1 .

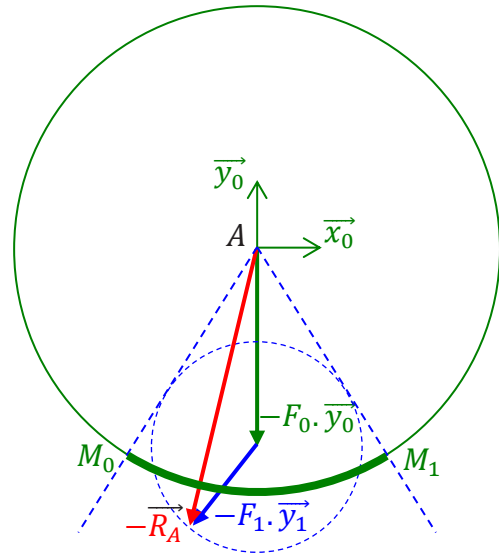


Figure 30 -
Représentation de $-\vec{R}_A$ dans R_0
pour $\dot{\theta} < \omega_{lim}$

Q55. Compléter le DR6 en représentant le vecteur $\vec{R}_A = F_0 \cdot \vec{y}_0 + F_1 \cdot \vec{y}_1$ dans le repère R_1 et $-\vec{R}_A$ dans le repère R_0 , pour le régime $\dot{\theta} > \omega_{lim}$. Conclure sur les zones où la charge s'appliquerait.

Au cours du fonctionnement, la répartition de pression d'huile n'est pas homogène sur la circonférence du palier comme le montre la figure 31.

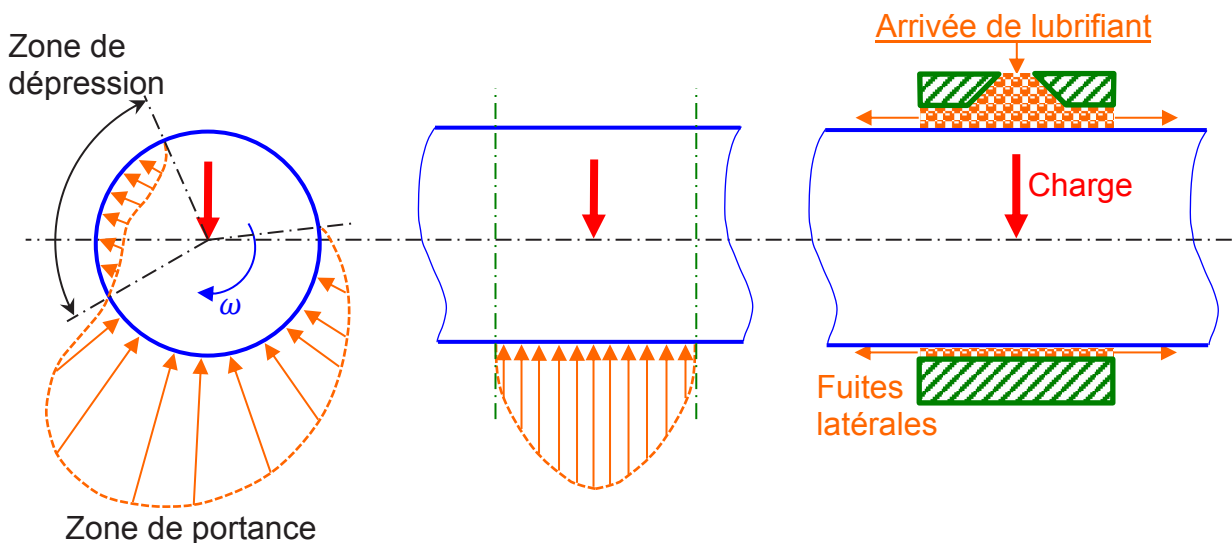


Figure 31 – Zones de portance et de dépression dans un palier

Pour garantir le bon fonctionnement des paliers, il faut veiller à ce que les zones où l'épaisseur du film d'huile risque d'être faible (les zones de portance) soient à l'opposé des orifices qui injectent l'huile dans le palier.

En fonctionnement normal, des études ont montré que la vitesse de rotation nominale de la turbine ω_{nom} reste inférieure à la vitesse ω_{lim} avec $\frac{\omega_{lim}}{\omega_{nom}} \approx 2$.

Par contre, en phase de délestage du barrage, pour éviter des surpressions dans les conduites, les vitesses de vannage sont régulées et peuvent engendrer des survitesses de la turbine pouvant aller jusqu'à 180 % de la vitesse nominale pendant quelques dizaines de secondes.

Q56. Conclure sur le risque de détérioration des paliers en fonctionnement normal et en phase de délestage.

V. ÉTUDE DES MOYENS DE MAINTENANCE DES ÉLÉMENTS D'UN GROUPE HYDROELECTRIQUE

Afin de prévenir la perte d'une unité de production, des actions de maintenance préventives sont mises en place. Ces actions sont réalisées grâce à un pont roulant bipoutre de longueur L et dont les dimensions sont indiquées sur le DT13.

La flèche liée à la charge permanente doit être inférieure à $L/400$.

La charge maximale à soulever est de 600 tonnes.

Afin d'être précis lors des manœuvres de manutention, la flèche de la poutre doit être inférieure à $L/750$.

Objectif : valider le dimensionnement des poutres transversales du pont roulant.

V.1 Modélisation d'une poutre transversale du pont roulant

La modélisation proposée d'une poutre transversale en acier dans le plan (O, \vec{x}, \vec{y}) est donnée figure 32.

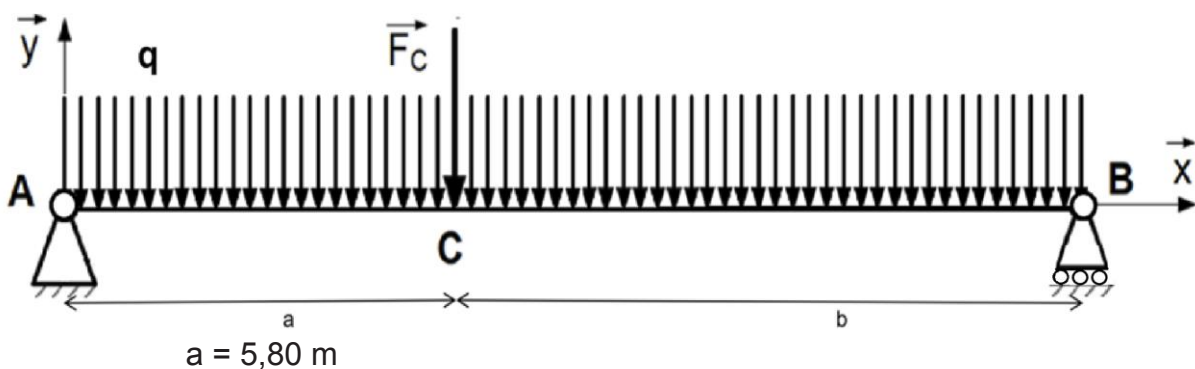


Figure 32 – Modèle d'une poutre transversale du pont roulant

Q57. Citer trois hypothèses de la théorie des poutres.

Q58. Justifier le modèle de charges proposées pour représenter les actions sur une poutre transversale du pont roulant. Indiquer le degré d'hyperstaticité du modèle.

Q59. Calculer, en utilisant le DT13, la valeur du poids propre q de la poutre en $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ et la valeur de la force maximale F_c en kN.

La vérification aux états limites ultimes (ELU) est réalisée avec les valeurs majorées suivantes : $F_c = 4500 \text{ kN}$ $q = 75 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$

Q60. Nommer et déterminer les composantes du torseur des efforts de cohésion le long de cette poutre.

Q61. Représenter les diagrammes des efforts tranchants et des moments fléchissants sur le DR7 en y indiquant les valeurs caractéristiques.

V.2 Vérification du dimensionnement de la poutre

La vérification des exigences est réalisée par rapport aux contraintes normales, puis au niveau de la déformée induite uniquement par la charge répartie $f_r(x)$ et enfin relativement à la déformée totale $f(x)$.

Le moment fléchissant maximal est considéré égale à 15,8 MN m.

Q62. Vérifier le dimensionnement de la section de la poutre vis-à-vis des contraintes normales avec un coefficient de sécurité de 5.

Q63. Établir l'équation de la déformée $f_r(x)$ liée à la charge répartie de la poutre.

Q64. Calculer la flèche maximale liée à la charge permanente et conclure sur le dimensionnement de la poutre.

Pour une charge ponctuelle, l'équation de la déformée associée $f_p(x)$ a pour expression :

$$\text{Pour } 0 < x < a \quad f_p(x) = \frac{F_c \cdot (L-a)}{6E.I.L} \cdot x \cdot (x^2 - a \cdot (2L - a))$$

$$\text{Pour } a < x < L \quad f_p(x) = \frac{F_c \cdot a}{6E.I.L} \cdot (L - x) \cdot ((L - x)^2 - L^2 + a^2)$$

Q65. Indiquer les conditions aux limites permettant d'obtenir les équations de la déformée $f_p(x)$ de la poutre liée à la charge ponctuelle.

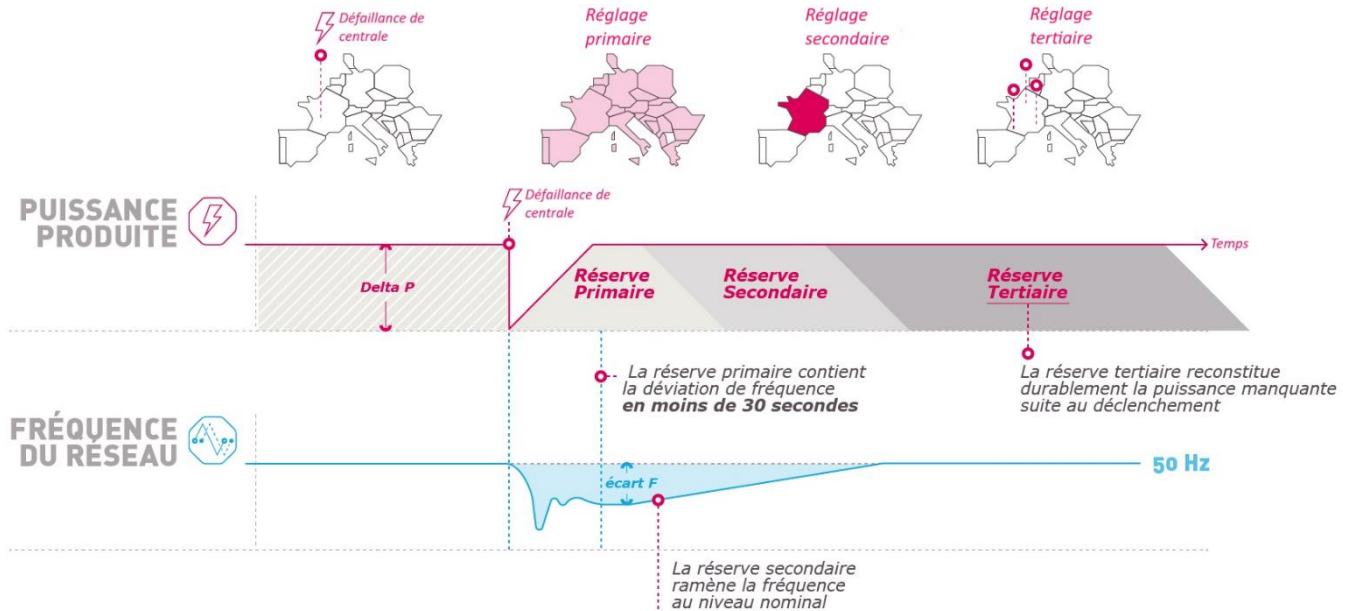
La valeur maximale de la déformée est observée au point d'abscisse $x = 6,24 \text{ m}$.

Q66. Calculer la flèche maximale δ_{\max} de la poutre et conclure sur son dimensionnement.

DT1 – Les réserves de puissances

Activation séquentielle des réserves

Source : RTE



Le réglage primaire est une réserve de puissance de stabilisation de la fréquence mise en œuvre par les producteurs qui disposent de l'aptitude correspondante (entités de réserve de type « injection », « soutirage » ou « mixte »). Elle intervient lorsque l'écart de fréquence des signaux électriques mesurée sur le site de production est supérieur ou égal à 200 mHz. Le réglage secondaire est une réserve de puissance de restauration de la fréquence et des réserves primaires.

Le réglage tertiaire, quant à lui, est un mécanisme d'ajustement des consignes d'injection et de soutirage des puissances piloté par un dispatcher.

Pour les 10 % des sites de production d'électricité en France qui participent à la régulation primaire, le réglage primaire est mis en œuvre par l'action d'une régulation de gain K, aussi appelé l'énergie réglante du site.

Chaque groupe de production participant à la régulation primaire de fréquence dispose d'une marge propre de puissance disponible appelée « réserve primaire ».

DT2 - Caractéristiques techniques des alternateurs

Type : KV-498 147 Constructeur : ALSTOM

Donnée	Compléments	Unité	Valeur
Puissances électriques nominales	Puissance active	kW	20 000
	Puissance apparente	kVA	20 202
Tension de sortie	Tension composée	V	3 500
Nombre de paires de pôles			36
Vitesse de rotation	Nominale	Tr·min ⁻¹	83,3
	Emballement		314,0
Rotor	Nombre de pales orientables		4
	Diamètre	m	4,592
Stator	Isolation ISOTENAX		
	Entrefer	mm	4
Ventilation forcée avec enceinte surpressée à 2 bars absolus	Nombre de ventilateurs		2
	Nombre d'échangeur à circulation d'eau		2
	Débit	m ³ ·h ⁻¹	72
	Nombre de déshydrateur		1
Palier alternateur type à coussinets	Injection au démarrage et à l'arrêt Lubrification par circulation d'huile		
	Charge d'huile turbo-oil SHELL	L	25000
Masse mobile		t	73
Masse totale		t	165
Freinage par 4 patins – fluide air comprimé	Pression du fluide d'air comprimé	bars	7
	Pression de l'enceinte de retour d'échappement	bars	2

Excitation des alternateurs de type STATIQUE

Transformateurs (dans un caisson en amont de l'usine) : 2 de 3,5/3,5/63 kV 40 MVA

- Un transformateur série alimentant un pont de diodes au silicium,
- Un transformateur de soutirage alimentant un pont mixte de diodes au silicium-thyristors

Les thyristors sont contrôlés par un générateur d'impulsions qui se trouve lui-même sous la dépendance soit d'un rhéostat pour la marche manuelle, soit d'un régulateur de tension pour la marche automatique.

Ce régulateur comporte en outre, un dispositif de limitation de courant.

Transformateur série :

Triphasé

Type intérieur à refroidissement naturel, en service continu

PRIMAIRE : Puissance en service normal : 195 kVA

Puissance magnétisante absolue à secondaire ouvert pour un courant de ligne de 3800 A : 278 kVAR

SECONDAIRE : Puissance de dimensionnement 180 kVA pour alimentation de redresseurs montés en pont de Graetz 101 kW – 108 V – 930 A.
 Intensité maximale admissible en régime permanent : 1000 A.
 Surcharge 25% pendant 15 min – 1 à 2 fois par jour.

Annexe 15 : Trame type de certification de l'aptitude au réglage primaire de fréquence
Source : RTE

3. REGLAGE PRIMAIRE DE FREQUENCE

L'Entité de Réserve doit disposer d'une aptitude au réglage primaire (mode FSM) caractérisée par :

- Un volume de réserve de puissance active, dite « réserve primaire, RP » pouvant être mis à disposition de RTE à la hausse ou à la baisse.
- Une loi de réglage permettant de définir la fourniture effective de cette réserve en réponse à une variation de fréquence.
- Une dynamique temporelle (délai d'activation pour la mise à disposition de cette réserve, et durée de maintien de fourniture de cette réserve)

Le fonctionnement en réglage primaire de fréquence doit être possible lors des pentes de variation de puissance de consigne.

Loi de réglage (caractéristiques de la réponse à une variation de fréquence)

L'Entité de Réserve doit être équipée d'un régulateur primaire de fréquence assurant la loi de réglage suivante :

$$P - P_c = -K \cdot (f - f_n)$$

avec :

P [MW] : puissance réelle fournie par l'Entité de Réserve en mode quasi stationnaire

P_c [MW] : puissance de consigne de l'Entité de Réserve à la fréquence de référence f_n

f [Hz] : fréquence mesurée sur le réseau

f_n [Hz] : fréquence nominale (50 Hz)

K [MW/Hz] : gain de l'Entité de Réserve

La convention de signe utilisée est la convention producteur, c'est à dire qu'une valeur de P positive correspond à une injection de puissance et une valeur négative à un soutirage.

Le gain K de l'Entité de Réserve peut être réglable. Pour une RP, il ne peut être supérieur à $K_{max} = 25$ RP MW/Hz et ne peut être inférieur à $K_{min} = 5$ RP MW/Hz.

En exploitation, les valeurs des gains à la hausse et à la baisse pourront être différentes, la valeur de chacun des gains devra :

- garantir la libération de la totalité de la réserve mise à disposition de RTE pour tout écart de fréquence d'amplitude supérieure ou égale à 200 mHz quelle que soit la puissance de consigne,
- Lorsque $f > f_n$ ou lorsque $f < f_n$
 - o Etre constant à minima sur une durée de 15 min¹ et en cohérence avec les modifications de puissance de consigne
 - o Etre indépendant de la variation de la fréquence.

Une bande morte volontaire peut-être définie dans la régulation de fréquence, à condition de pouvoir être réglable, et notamment mise à 0 (inactive) dans le cas où l'unité participe au réglage primaire de fréquence.

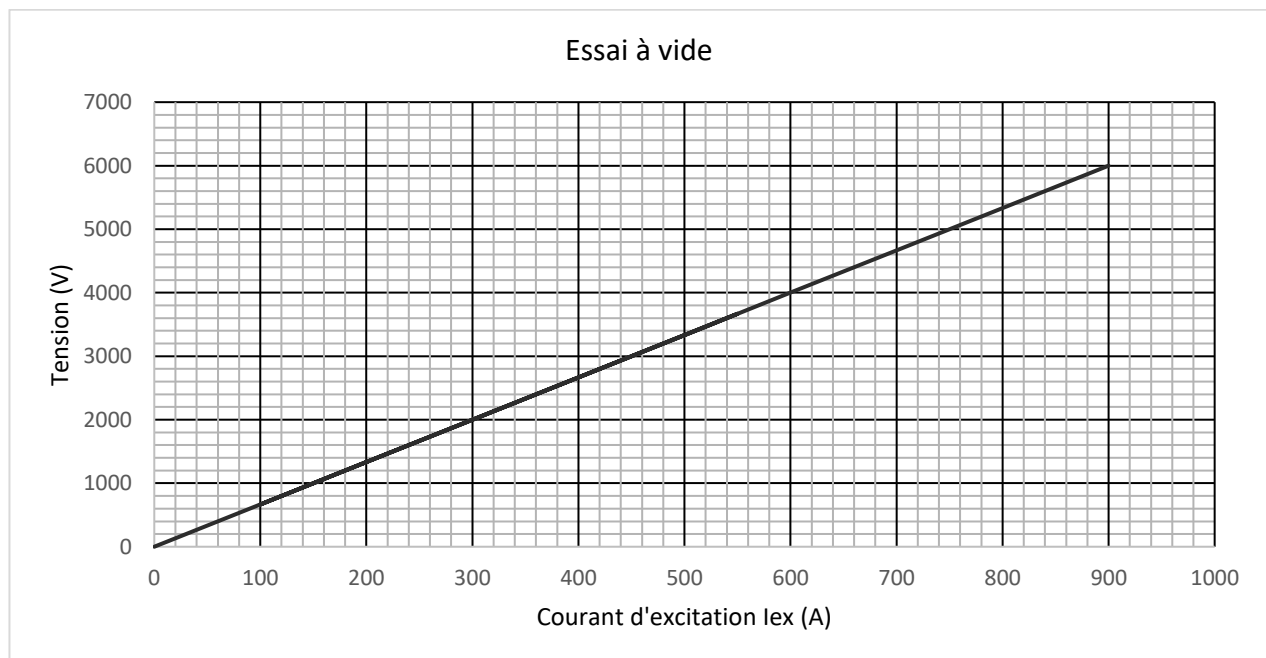
DT4 – Résultats des essais sur un alternateur

Résultat de la mesure à chaud de la résistance entre phases :

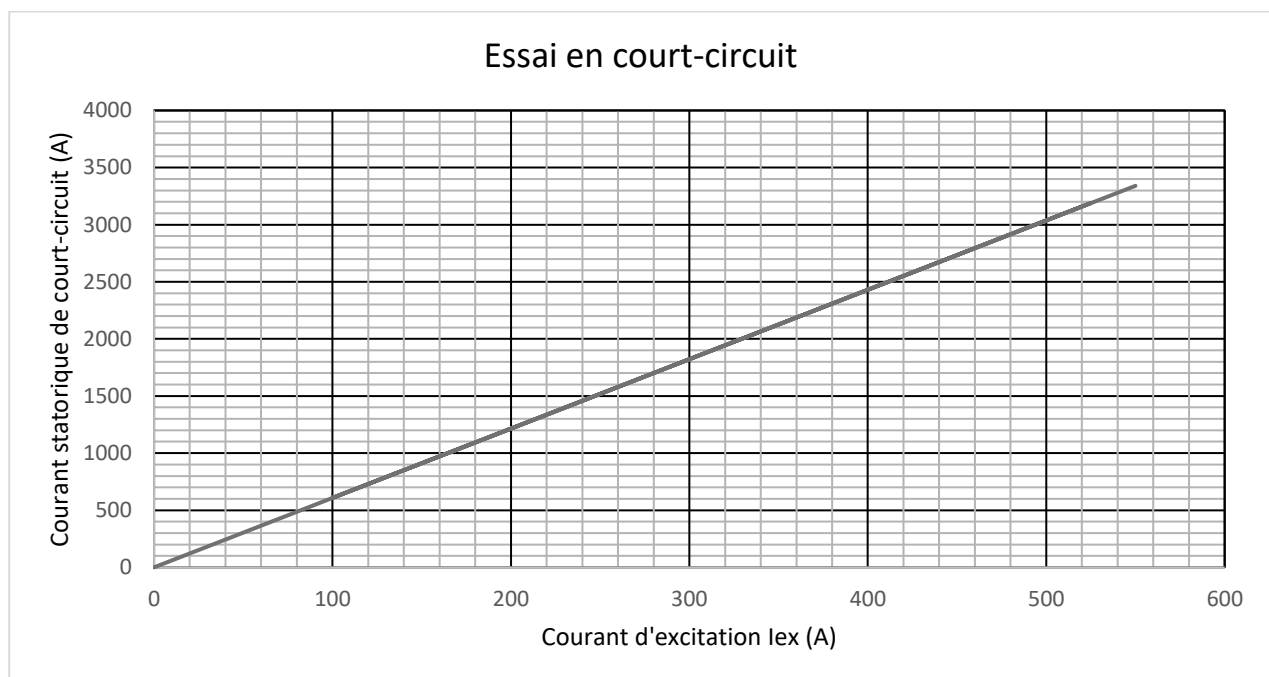
$$I_{\text{mes}} = 333 \text{ A}$$

$$U_{\text{mes}} = 8,0 \text{ V}$$

Résultats de l'essai à vide de l'alternateur

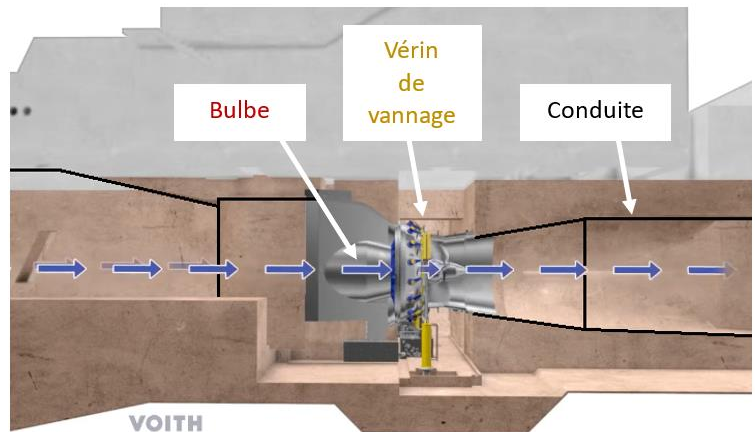


Résultats de l'essai en court-circuit de l'alternateur

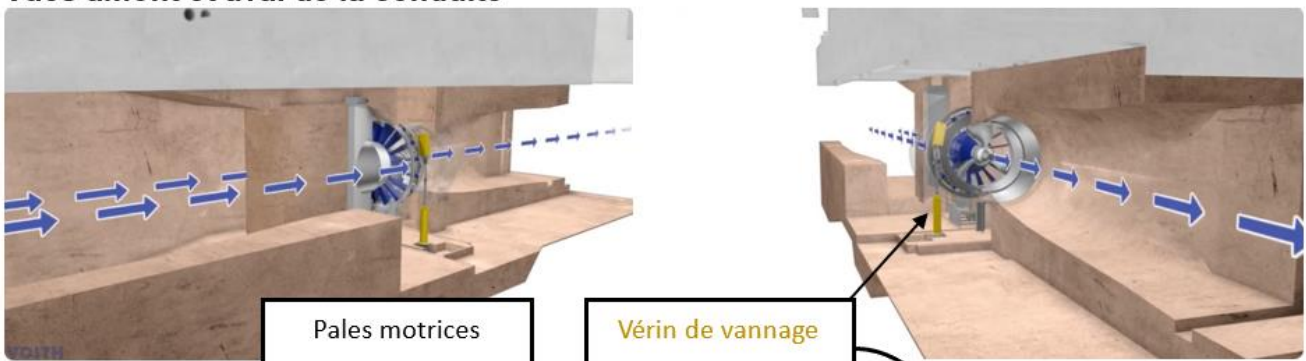


DT5 – Mécanismes de vannage et de turbinage

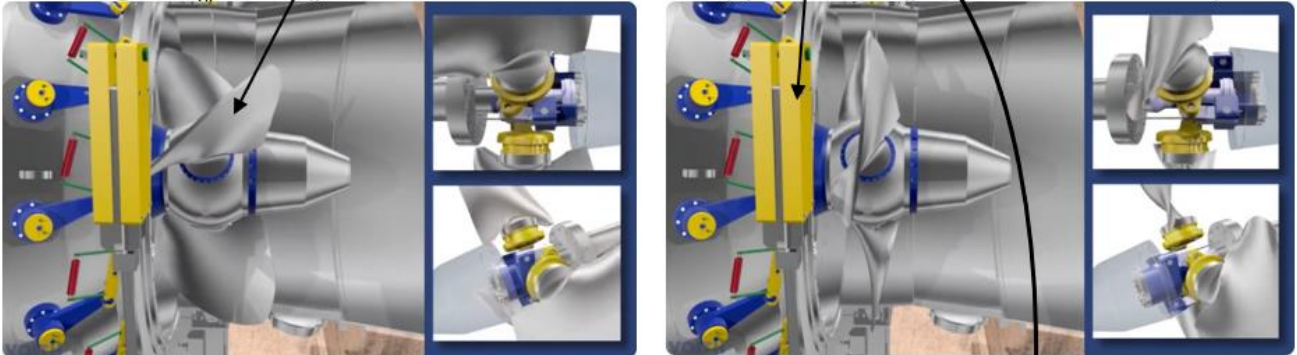
Voith GmbH & Co, est une entreprise familiale allemande, spécialisée dans la mécanique lourde de précision, qui produit des turbines à bulbe avec leurs dispositifs d'asservissement, à la CNR. Les illustrations de ce document représentent la turbine à bulbe installée dans sa conduite, située sous le bâtiment de la centrale électrique.



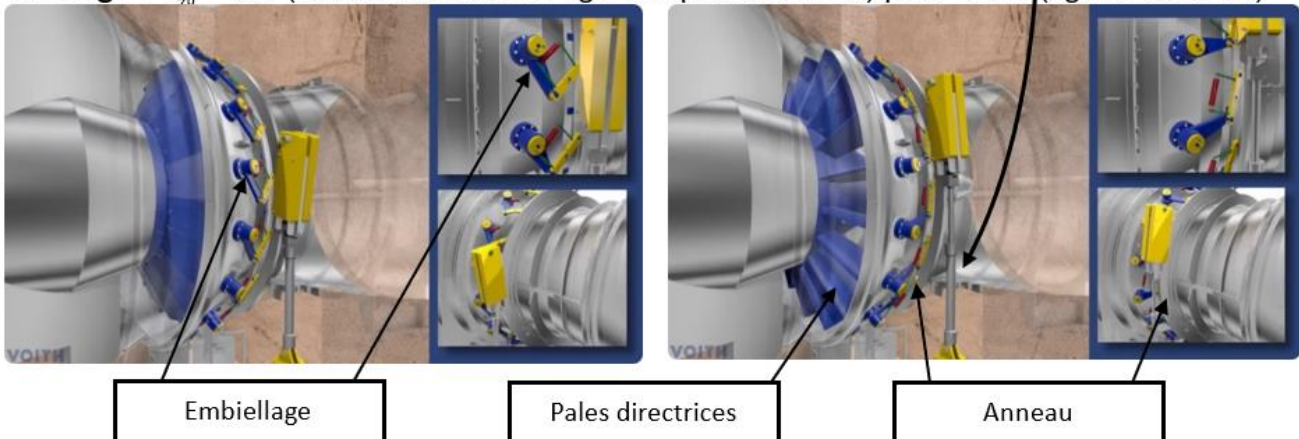
Vues amont et aval de la conduite



Turbinage : $T_{\%} = 0\%$ (pales motrices inclinées de 0°) puis 100% (pales inclinées de 70°)



Vannage : $V_{\%} = 0\%$ (conduite fermée et tige à la position 0mm) puis 100% (tige à 1000mm)



DT6 – Essais de conjugaison

Remarque concernant la lecture de ce document

Les trois séries d'essais effectuées sur le site de Pierre-Bénite à trois dates différentes, ont permis d'établir le fichier texte suivant, utilisé comme fichier d'entrée par le programme de conjugaison. Les données y sont normalement agencées en une seule colonne de 72 lignes, et non pas deux colonnes de 36 lignes. L'affichage du fichier en deux colonnes sur une seule page, a été choisi pour faciliter la lecture de ce document technique.

Fichier d'entrée « essais_PB.txt »

Date;Heure;Alt_retenue;Alt_restitution;H_chute	10;625;17,5;;
02/06/2020;11:14:52;166,65;157,5;9,15	11;650;20;;
essai;vannage_mm;turbinage_°;;	12;675;22;;
1;250;0;;	13;700;24;;
2;300;0;;	14;725;27;;
3;350;0;;	15;750;30;;
4;400;0;;	16;775;33;;
5;450;4;;	17;800;38;;
6;500;9;;	18;850;45;;
7;550;14;;	19;900;58;;
8;575;16;;	20;950;61;;
9;600;18;;	;;;
10;625;22;;	Date;Heure;Alt_retenue;Alt_restitution;H_chute
11;650;26;;	11/02/2021;15:31:07;164,8;150;14,8
12;675;30;;	essai;vannage_mm;turbinage_°;;
13;700;33;;	1;250;0;;
14;725;36;;	2;300;0;;
15;750;39;;	3;350;0;;
16;775;43;;	4;400;10;;
17;800;47;;	5;450;18;;
18;850;57;;	6;500;22;;
19;900;62;;	7;550;26;;
20;950;62;;	8;575;27;;
;;;	9;600;30;;
Date;Heure;Alt_retenue;Alt_restitution;H_chute	10;625;38;;
18/09/2020;15:31:07;164,6;158,6;6	11;650;44;;
essai;vannage_mm;turbinage_°;;	12;675;48;;
1;250;0;;	13;700;52;;
2;300;0;;	14;725;56;;
3;350;0;;	15;750;60;;
4;400;0;;	16;775;62;;
5;450;0;;	17;800;63;;
6;500;5;;	18;850;65;;
7;550;10;;	19;900;65;;
8;575;12,5;;	20;950;65;;
9;600;15;;	;;;

DT7 – Programme de conjugaison incomplet

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 ##### Définition des variables #####
5 fichier_entree = 'essais_PB.txt'
6 fichier_sortie = 'Résultats_d_interpolation_linéaire.png'
7 reference_vannage=1000
8 reference_turbinage=70
9
10
11 """ 1ère étape / Récupération des données du fichier d'entrée """
12
13 series_list = [] # Créer la liste des séries qui contiendra pour chaque série, un tableau (une liste)
14                  # de vecteurs (vannage,turbinage) contenant les valeurs de chaque essai de la série.
15
16 def isVector(essais): # définition d'une fonction de tri des données numériques ou textuelles
17     try:
18         float(essais[1]) # Essayer de convertir la 2ème valeur de la ligne en nombre
19         float(essais[2]) # Essayer de convertir la 3ème valeur de la ligne en nombre
20         # Si le test fonctionne, passer à la suite
21     except: # Si le test échoue
22         return False # Renvoyer False
23     return True # Si aucun essai n'a échoué à être converti en nombre, renvoyer True
24
25 with open(fichier_entree, 'r') as fichier: # Ouvrir le fichier en mode lecture
26     lignes = fichier.readlines() # Lire chaque ligne du fichier
27
28 serie_courante={'hauteur':None,'essais':[]} # Créer une liste qui collectera les données d'une série
29 en cours de lecture, initialement vide d'essais et pour une hauteur inconnue
30
31 for ligne in lignes: # Parcourir chaque ligne
32     ...à compléter pour # Supprimer les caractères de saut de ligne
33     ...à compléter pour # Convertir 'virgule' en 'point' pour pouvoir interpréter les nombres
34     valeurs_essai = ligne.split(';') # Séparer les valeurs de la ligne d'essai
35     if not isVector(valeurs_essai):
36         if len(serie_courante['essais'])>0:
37             series_list.append(serie_courante)
38             serie_courante={'hauteur':None,'essais':[]}
39         if valeurs_essai[0].count('/')==2:
40             serie_courante['hauteur']=float(valeurs_essai[-1])
41     else: # Si les valeurs de l'essai lues font que sa ligne est un vecteur, classer les valeurs
42         vannage=float(valeurs_essai[1])/reference_vannage
43         turbinage=float(valeurs_essai[2])/reference_turbinage
44         turbinage=round(turbinage,3) # Arrondir à 3 décimales
45         serie_courante['essais'].append([vannage,turbinage]) # Enregistrer le vecteur de l'essai
46
47 if len(serie_courante['essais'])>0: # Si la série en cours contient des vecteurs d'essais
48     series_list.append(serie_courante) # Enregistrer la série en cours dans la liste de séries
```

```

49 """ 2ème étape / Classement des séries et de leurs données """
50
51 def fonctionDeTri(serie): # Définir une fonction qui permet de sélectionner une valeur de tri dans
    la série en cours, pour l'identifier par rapport aux autres séries
52     return serie['hauteur'] # Cette valeur de tri sera la valeur de la hauteur propre à la série
53
54 series_list=sorted(series_list,key=fonctionDeTri) # Trier les séries par hauteur croissante
55
56 # Hypothèses du protocole : Toutes les séries ont été réalisées avec le même nombre d'essais (20),
57 # et ces essais ont été réalisés avec les mêmes valeurs réglées de vannage (250 à 950 mm)
58
59 V_vannage=[] # Créer le Vecteur_vannage contenant les valeurs relatives de vannage communes
60 ...à compléter pour # Lancer une boucle « for »
61 ...à compléter pour # Enregistrer les vingt valeurs relatives de vannage
62 nombre_essais=len(V_vannage)
63
64 V_turbinages_list=[] # Créer une liste des Vecteur_turbinage, pour chaque chaque série
65 hauteurs=[]
66 for serie in series_list:
67     V_turbinage=[] # Créer le Vecteur contenant les valeurs relatives de turbinage de la série
68     for i in range(nombre_essais):
69         V_turbinage.append(serie['essais'][i][1])
70     V_turbinages_list.append(V_turbinage)
71     hauteurs.append(serie['hauteur']) # Associer la hauteur de la série aux turbinages associés

82 """ 3ème étape / Interpolation linéaire des turbinages """
83
84 V_vannage=np.array(V_vannage) # Transformation en array numpy pour faciliter l'interpolation
85 for i in range(len(V_turbinages_list)):
86     V_turbinages_list[i]=np.array(V_turbinages_list[i])
87
88 def interpolation_lineaire(h):
89     i = 0 # On initialise i à 0 (comptage de pas i des 3 valeurs du vecteur hauteurs)
90     while not((hauteurs[i] <= h) and (h < hauteurs[i+1])):
91         i = i + 1

99 plt.figure(figsize = (10, 10)) # Initialisation d'un graphique illustrant les turbinages interpolés
100 symboles = ['o', 's', '^']
101 for i in range(len(hauteurs)): # Tracer les valeurs expérimentales sur le graphique
102     plt.plot(list(V_vannage),list(V_turbinages_list[i]),symboles[i],label='hauteur='+str(hauteurs[i])+ 'm')
103 for h in range(int(hauteurs[0]),int(hauteurs[-1])+1): # Pour toute valeur de h possible, au pas de 1
104     V_turbinage_lin = interpolation_lineaire(h) # Calculer le turbinage associé par interpolation
105     plt.plot(V_vannage, V_turbinage_lin, label='h='+str(h)+'m') # Tracer ce turbinage
106 plt.legend()
107 plt.savefig(fichier_sortie)
108 print("Les données ont été écrites dans le fichier "+str(fichier_sortie))
109 input('Appuyer sur une touche pour terminer le programme normalement')

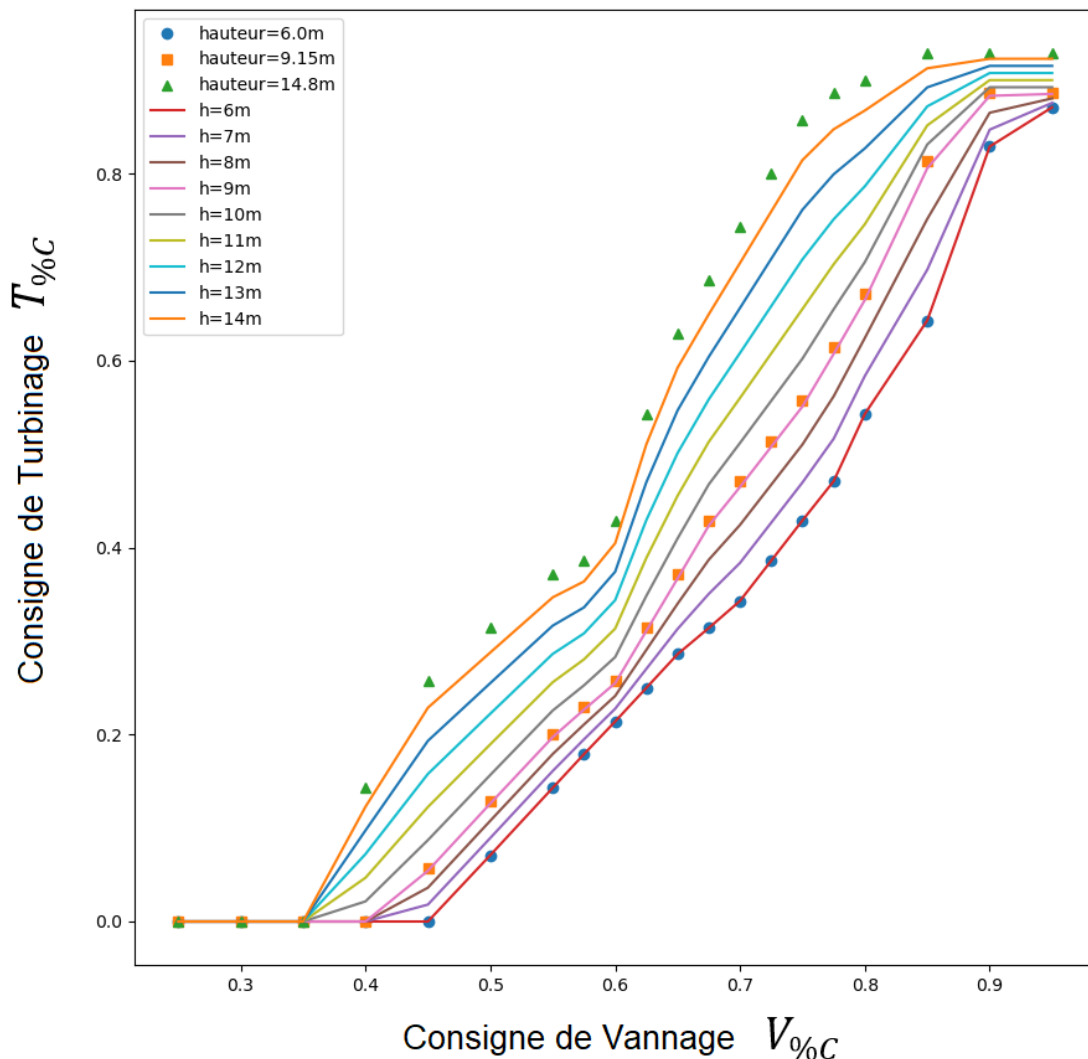
```

Fin du programme de conjugaison étudié

Le programme, étudié dans ce document, finit par enregistrer l'ensemble des données dans le fichier de sortie « Résultats_d_interpolation_lineaire.png », qui est un fichier image, qui contient le graphe représenté ci-dessous, avec :

- en abscisse : les valeurs relatives réelles de vannage qui évoluent de 250 mm à 950 mm ce qui correspond à une plage d'utilisation de 25 % à 95 % d'ouverture de la conduite.
- en ordonnée : les valeurs relatives réelles de turbinage sont discrètes et sont représentées sur le graphe avec les symboles (●■▲)

Les valeurs relatives théoriques de turbinage sont aussi discrètes, mais sont représentées liées selon la hauteur h avec laquelle elles ont été calculées par l'interpolation linéaire.



Remarque

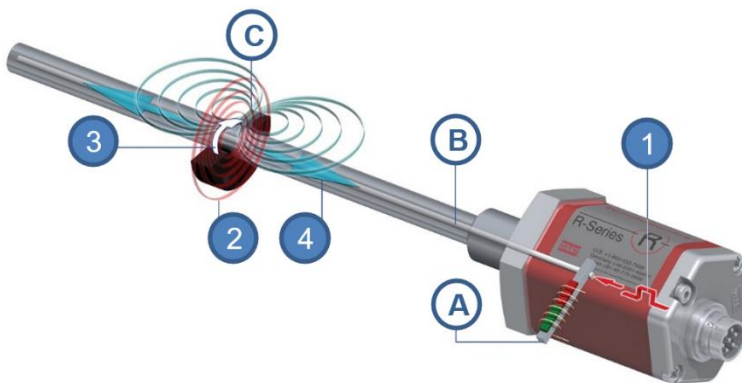
Le sujet n'étudie pas le **programme de conjugaison complet** qui est utilisé sur le site de Pierre-Bénite. En particulier, les instructions manquantes concernent :

- la manière dont le programme importe à un instant donné t , la valeur de consigne de vannage $V_{\%C}(t)$ et la valeur mesurée de hauteur de chute $H_{chute}(t)$, pour calculer la valeur de consigne de turbinage $T_{\%C}(t)$,
- la manière dont le programme exporte la consigne de turbinage $T_{\%C}(t)$ calculée, vers le terminal de commande de l'asservissement de turbinage.

DT8 – Fonctions usuelles du langage Python

Boucle for	<pre>for i in range(10) : print(i)</pre>
Définit une fonction à deux arguments, qui renvoie un résultat après exécution.	<pre>def fonction(x,y) : return x**2+y**2</pre>
La méthode replace() renvoie une copie de la string de caractères spécifiée par une autre chaîne de caractères spécifiée : <ul style="list-style-type: none">- oldStr(Obligatoire) : La chaîne à rechercher- newStr(Obligatoire) : La chaîne par laquelle remplacer l'ancienne chaîne	<pre>string.replace(oldStr, newStr)</pre>
La méthode strip() renvoie une copie de la string sans les caractères de saut de ligne	<pre>string.strip()</pre>
La méthode split() divise une chaîne selon le séparateur spécifié et renvoie une liste de chaînes.	<pre>L=string.split(« \t »)</pre> <p>Convertit une chaîne en une liste de sous chaînes dont le séparateur est une tabulation.</p>
Retour chariot	<pre>\n</pre>

DT9 - Capteur magnétostrictif



A : Convertisseur d'impulsions
 B : Guide d'onde
 C : Aimant de position

1 : Impulsion électrique
 2 : Champ magnétique radial
 3 : Contrainte de torsion
 4 : Onde ultrasonique

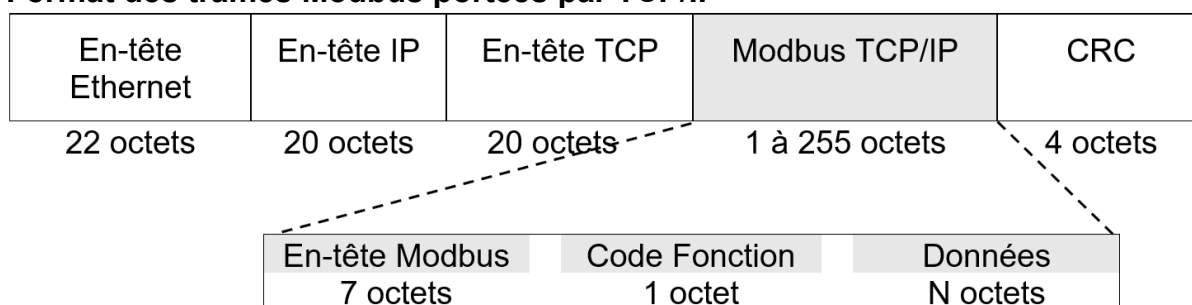
Chaque capteur de position Temposonics® comprend un guide d'ondes ferromagnétiques, un aimant de position et un convertisseur d'impulsion. L'aimant, fixé à l'objet en mouvement, génère un champ magnétique à sa position sur le guide d'ondes. Une courte impulsion électrique est appliquée au guide d'ondes. Ceci crée un champ magnétique radial momentané et une contrainte de torsion sur le guide d'ondes. Cette interaction momentanée entre deux champs magnétiques transversaux, libère une onde ultrasonique qui se propage tout au long du guide d'ondes et qui est convertie en signal électrique à son arrivée à la base du guide d'onde à l'aide d'un aimant situé dans une inductance de mesure. Cette tension de très faible amplitude sera ensuite traitée afin d'obtenir le temps de propagation de l'onde. Puisque la vitesse de l'onde est connue précisément, le temps requis pour recevoir le signal retour est mesuré à chaque impulsion et converti en une mesure de la position linéaire de l'aimant.

Caractéristiques techniques : G-series

Longueur de mesure	50 à 7620 mm
Résolution	5 µm
Linéarité	< +/- 0,02 % de l'échelle maximale
Vitesse du déplacement	< 1 m/s
Résolution	≤ 0,001 % de l'échelle maximale
Linéarité	< +/- 0,001 % de l'échelle maximale
Hystérésis	≤ 10 µm
Test aux chocs DIN IEC60068-2-27	100 g (choc simple)
Test aux vibrations DIN IEC60068-2-6	15 g / 10...2000 Hz
Température de fonctionnement	-40 ... +80 °C
Température de stockage	-40 ... +100 °C
Pression admissible en opération	350 bars
Signal de sortie	Start/Stop : Pulsation (RS422 SSD)
Gray	24 bits
Tension d'alimentation	24 Vdc +/- 20 %
Consommation maximale	16 mA
Résistance en sortie	3 kΩ
Protection	IP67
Connexion	D60

DT10 - Protocole MODBUS TCP/IP

Format des trames Modbus portées par TCP/IP



En-tête Modbus

- Identification de la transaction (2 octets) : ce champ est utilisé pour identifier les transactions circulant sur le réseau, afin que le client puisse faire le lien entre une requête émise et une confirmation reçue ;
- Identification du protocole (2 octets) : ce champ permet d'utiliser plusieurs variantes de protocoles et de les distinguer ; pour Modbus, ce champ est à 00 00 ;
- Longueur (2 octets) : ce champ indique la taille (en octets) de la trame Modbus à partir du champ suivant ;
- Adresse esclave (1 octet) : ce champ est utilisé afin d'identifier l'adresse Modbus de l'esclave sur cette ligne. Lorsque la trame est adressée à un client Modbus-TCP, ce champ prend pour valeur ff.

Code fonction

Code fonction		
Décimal	Hexadécimal	
01	01	Lecture de bits de sorties ou bits internes
02	02	Lecture de bits d'entrées
03	03	Lecture de mots de sorties ou de mots internes
04	04	Lecture de mots d'entrées
05	05	Écriture d'un bit
06	06	Écriture d'un mot

Format d'une trame de demande

	00	00			ff			
Identification de la transaction	Identification du protocole		Longueur	Adresse esclave	Code de la fonction	Adresse de départ		Nombre de bits ou de mots lus
2 octets	2 octets		2 octets	1 octet	1 octet	2 octets		2 octets

Format d'une trame de réponse

	00	00			ff			
Identification de la transaction	Identification du protocole		Longueur	Adresse esclave	Code de la fonction	Nombre d'octets renvoyés	Valeurs demandées	
2 octets	2 octets		2 octets	1 octet	1 octet	1 octet	N octets	

DT11 – Servo-distributeur

Les servo distributeurs MOOG®, de la série D680, sont des valves de débit à commande proportionnelle, pour des applications utilisant 2, 3, 4 ou 5 voies.

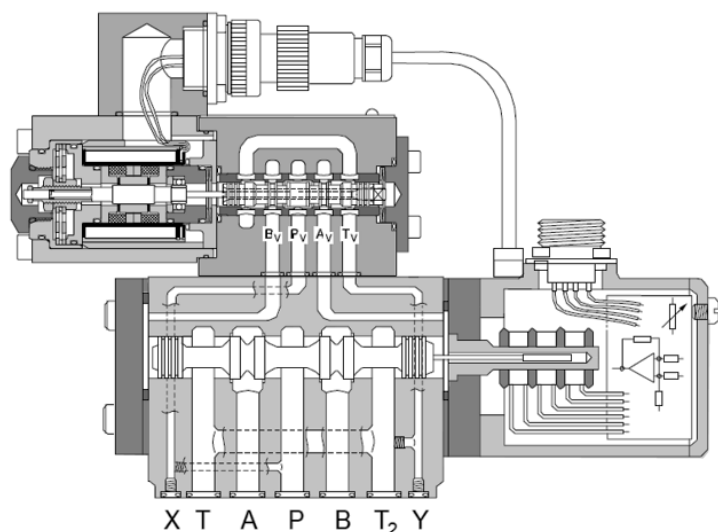
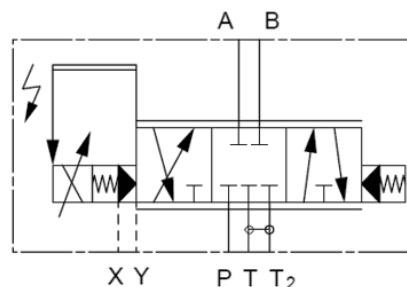


Schéma de principe, avec les voies A, B, P, T et T₂



Principe de fonctionnement

Une consigne électrique de commande permet l'alimentation en courant d'un solénoïde capable de déplacer la valve à action directe (valve supérieure sur le schéma).

Un capteur de position géré par un oscillateur/démodulateur, mesure la position de la valve principale (valve inférieure sur le schéma encore appelée tiroir principal). Une tension est renvoyée vers le micro-contrôleur pour être comparée à la tension de consigne de commande.

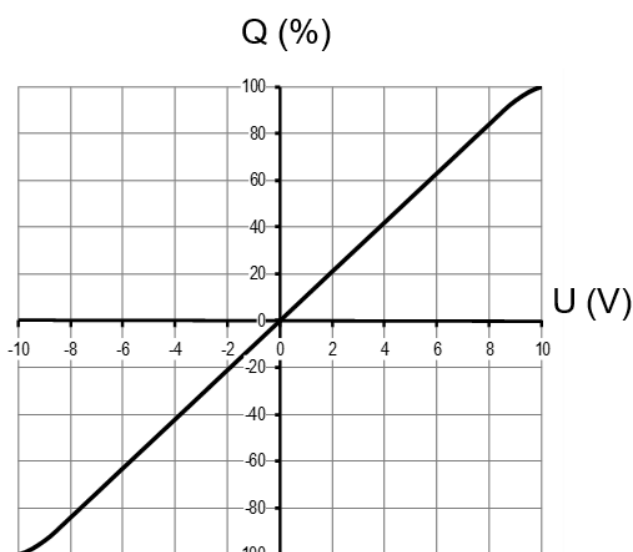
Le micro-contrôleur actionne la valve à action directe tant que l'erreur entre la tension de consigne et la tension renvoyée n'est pas nulle.

Ainsi, la position du tiroir principal est proportionnelle à la consigne électrique.

Caractéristiques de la série D680

Les fuites du circuit de pilotage de la valve à action directe sont inexistantes, économisant ainsi de l'énergie particulièrement dans les systèmes utilisant un certain nombre de valves.

La dynamique de la valve est quasi indépendante de la pression de fonctionnement et sa haute fréquence naturelle permet un gain élevé de la boucle d'asservissement de la position du tiroir principal. Ce qui donne une très bonne réponse statique et dynamique de la valve principale.

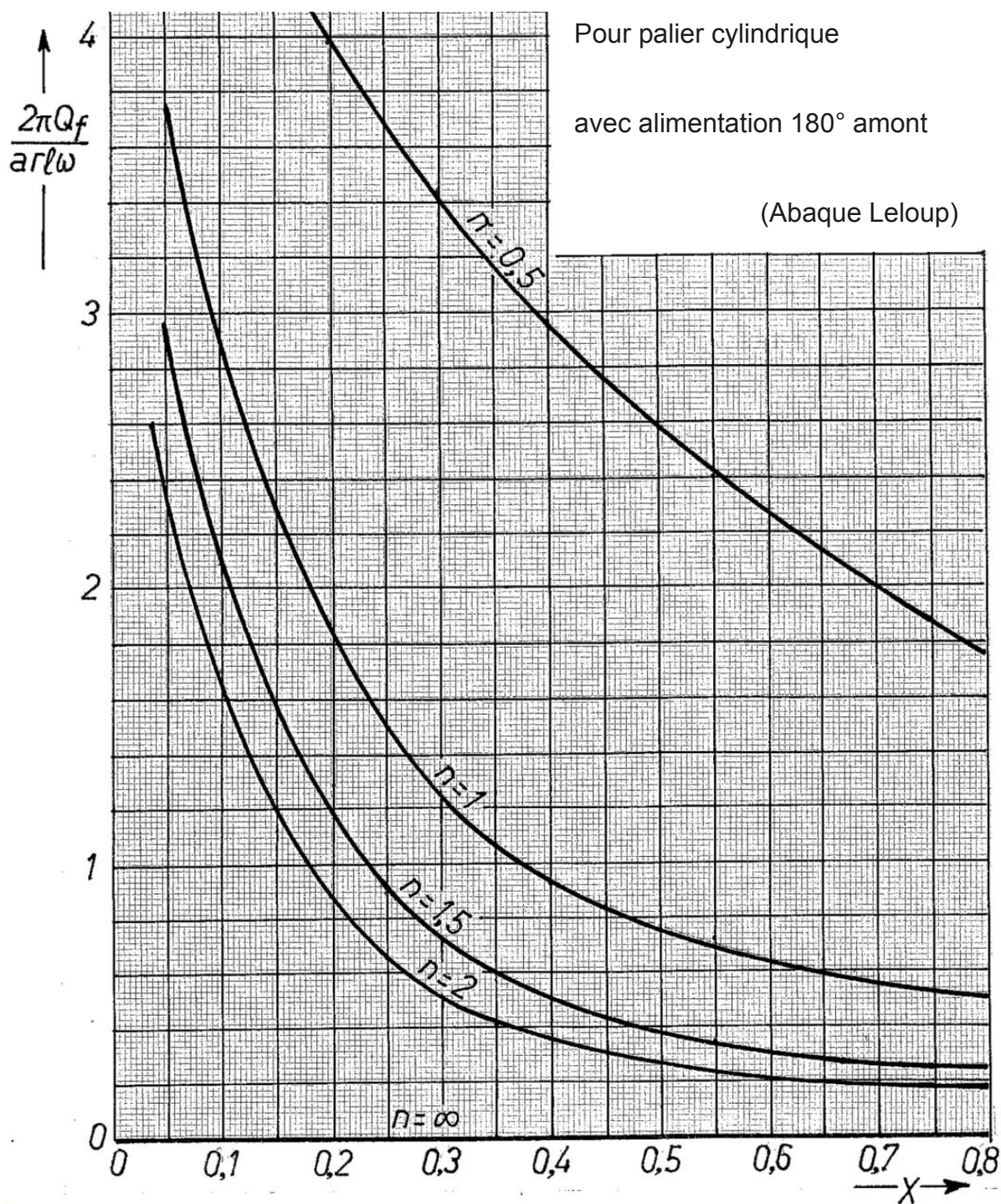


DT12 – Débit de fuite en régime hydrodynamique

Cet abaque permet de déterminer le débit de fuite noté Q_f à l'aide d'une grandeur sans dimension :

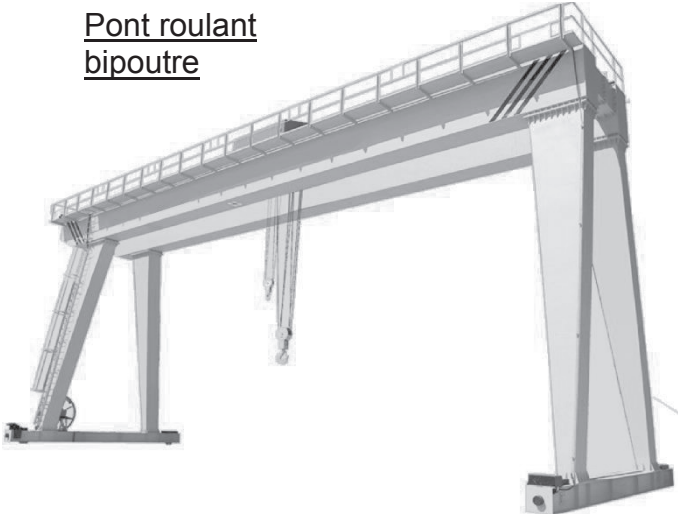
$$\frac{2\pi Q_f}{a r l \omega}$$

fonction de la variable de Sommerfeld χ et de l'élanement du palier $n = \frac{l}{2r}$ où l est la longueur du palier.

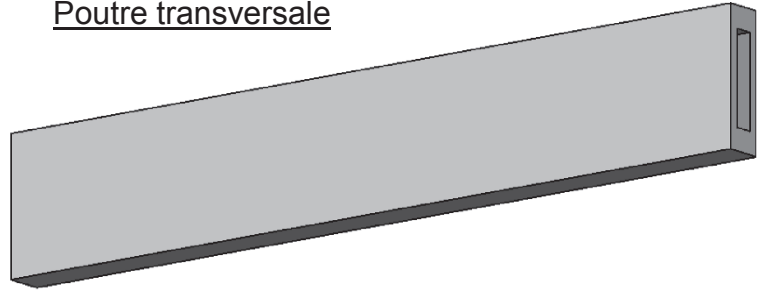


DT13 – Pont roulant

Pont roulant bipoutre



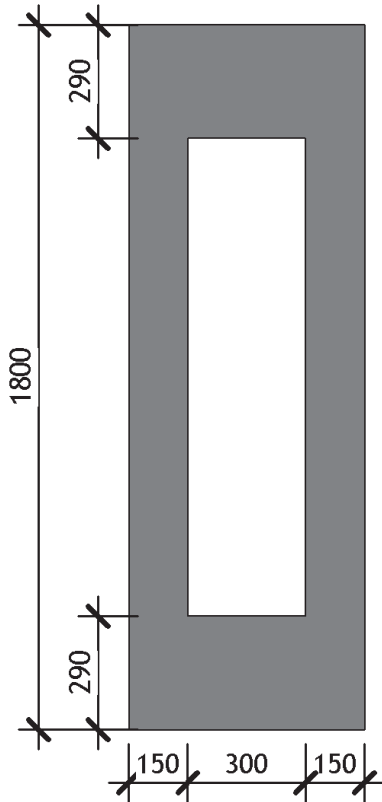
Poutre transversale



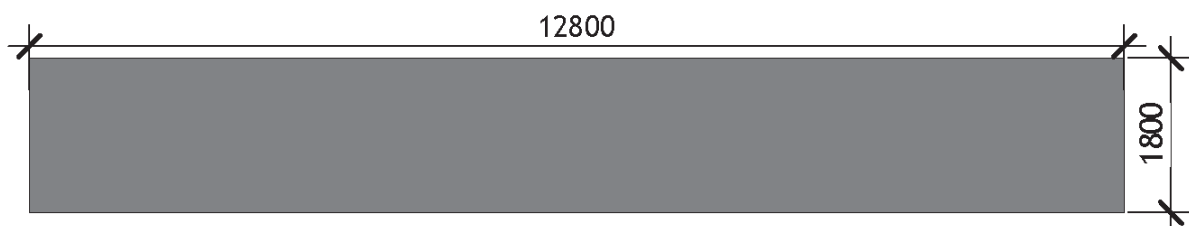
Caractéristiques physiques

Identité	Graphiques	Apparence	Physique	Thermique
Acier 345 MPa(3)				
Informations				
Nom	Acier 345 MPa(3)			
Description	Acier haute performance Fy 345 MPa			
Mots-clés	Haute performance, structurel, métal			
Type	Métal			
Sous-classe	Acier			
Source	Autodesk			
URL source				
Comportement				
Comportement	Isotrope			
Thermique de base				
Coefficient de dilatation thermique	0,00001 °C inv			
Physique				
Module de Young	200007,0 MPa			
Coefficient de Poisson	0,29			
Module de cisaillement	77 523,0 MPa			
Masse volumique	7 849,05 kg/m ³			
Résistance				
Limite d'élasticité	345,0 MPa			
Résistance à la traction	448,1 MPa			

Section - cotes en millimètres



Vue longitudinale - cotes en millimètres



Modèle CMEN v3

Nom de famille :
(Suivi, s'il y a lieu, du nom d'usage)

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--



Prénom(s) :

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

**Numéro
Candidat :**

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

**Né(e)
le :**

		/			/															
--	--	---	--	--	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Cadre réservé aux candidats de concours de recrutement et examens professionnels

Concours : **Option / Section :**

N° d'inscription :

--	--	--

Cocher une seule case parmi les six types de concours suivants :

externe 3^e externe externe spécial interne ou 1^{er} interne 2nd interne 2nd interne spécial

Cocher public OU privé
UNIQUEMENT pour les
concours enseignants : public privé

Examen professionnel pour l'avancement au grade de :

Cadre réservé aux candidats d'examens et du concours général

Examen : **Série / Spécialité :**

Epreuve - Matière : **Session :**

EAE STI 1

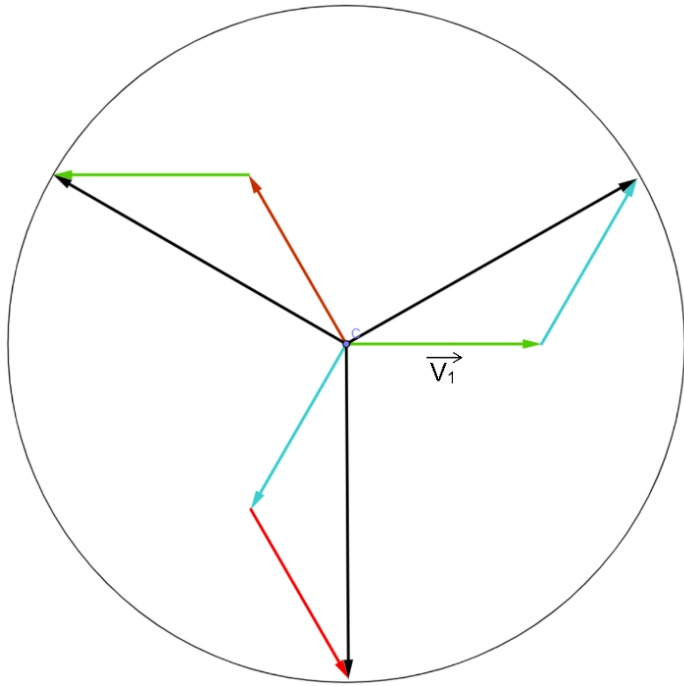
DR1 - DR4

**Tous les documents réponses sont à rendre,
même non complétés.**

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

DR1 – Système triphasé de tensions (question Q8)

REPRESENTATION DE FRESNEL DU RESEAU TRIPHASE DE TENSION



$$v_1(t) =$$

$$v_2(t) =$$

$$v_3(t) =$$

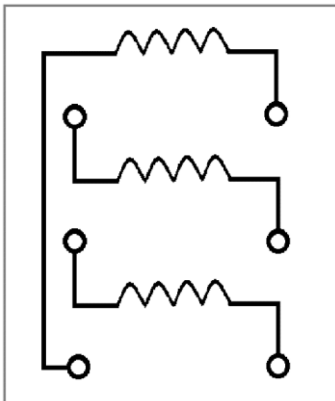
$$u_{12}(t) =$$

$$u_{23}(t) =$$

$$u_{31}(t) =$$

DR2 – Couplage et mesure (question Q9)

PLAQUE A BORNES DES ENROULEMENTS STATORIQUES DE LA MACHINE SYNCHRONE



DR3 – Modèle équivalent simplifié par phase et diagramme de Fresnel associé (question Q11)

MODELE EQUIVALENT SIMPLIFIE PAR PHASE

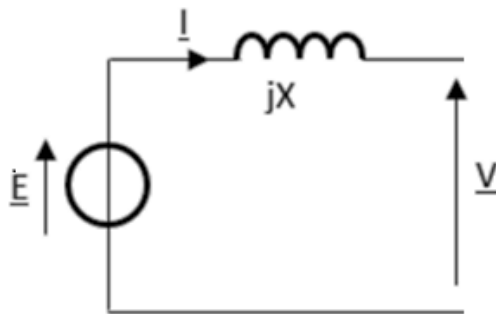
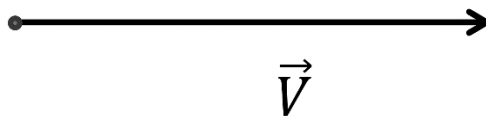
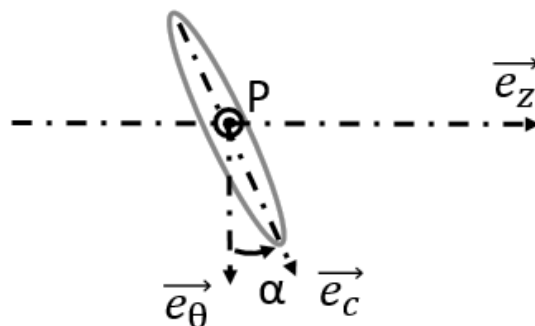


DIAGRAMME DE FRESNEL ASSOCIE



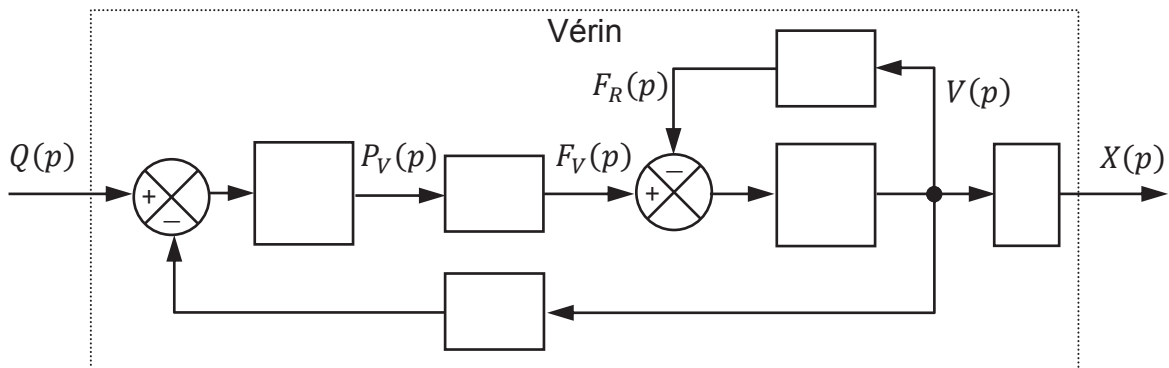
DR4 – Modélisation de la pale dans le plan $(\vec{e}_\theta, \vec{e}_z)$ (question Q37)



NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

DR5 – Asservissement de vannage (questions Q30 et Q33)

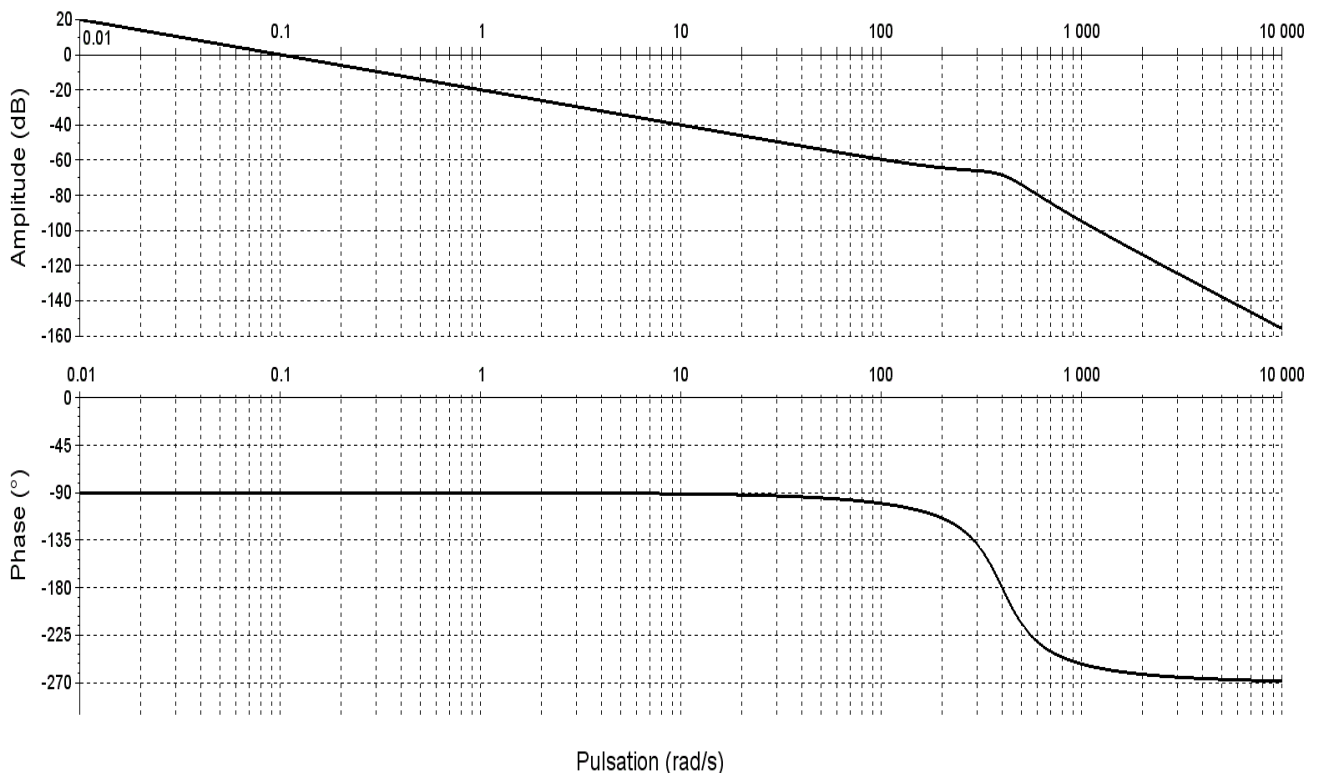
MODELISATION PAR SCHEMA BLOC DU VERIN DE VANNAGE (Q30)



COMPORTEMENT HARMONIQUE DU SYSTEME DE VANNAGE (Q33)

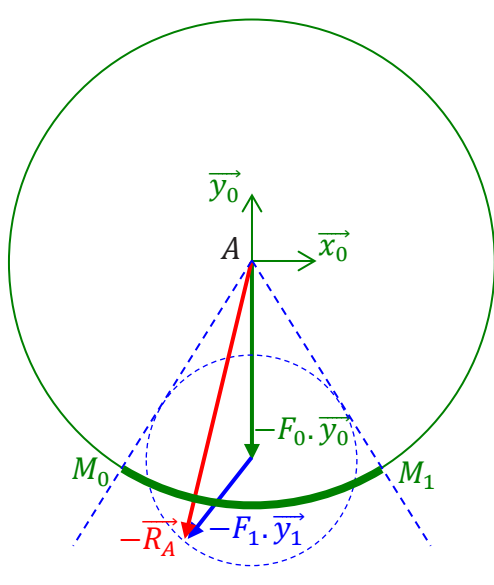
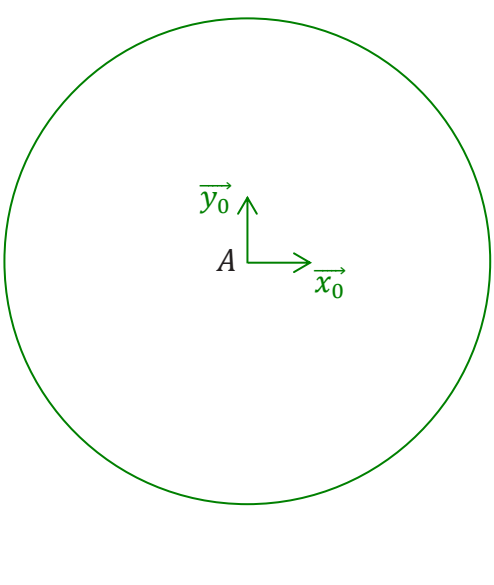
Diagrammes de Bode de la fonction de transfert en boucle ouverte non corrigée $H_{BO}(p)$, de l'asservissement en position du vérin de vannage donné figure 19 :

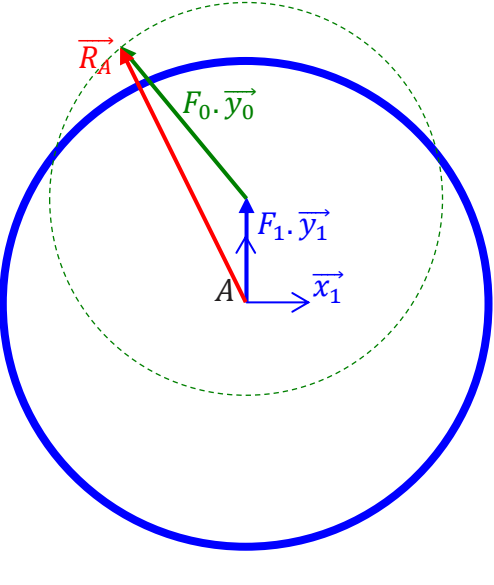
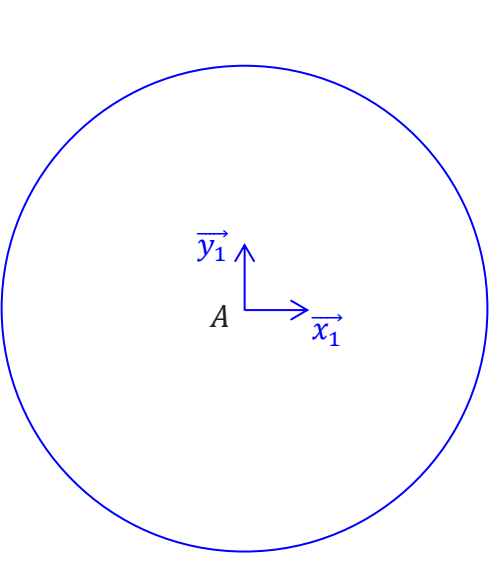
$$C(p) = 1$$



DR6 (question Q55)

Représentation de l'effort \vec{R}_A

Représentation de $-\vec{R}_A$ dans la base (\vec{x}_0, \vec{y}_0)	
Pour $\dot{\theta} < \omega_{lim}$	Pour $\dot{\theta} > \omega_{lim}$
 <p>The diagram shows a coordinate system (\vec{x}_0, \vec{y}_0) with origin A. A green circle represents the rotor. A dashed blue circle represents the contact zone between points M_0 and M_1. A red vector $-\vec{R}_A$ points from A towards the contact zone. Other vectors shown include $-F_0 \cdot \vec{y}_0$ (green), $-F_1 \cdot \vec{y}_1$ (blue), and \vec{y}_0 (green).</p>	 <p>The diagram shows a coordinate system (\vec{x}_0, \vec{y}_0) with origin A and a green circle representing the rotor. No contact zone is shown.</p>
<p>Conclusion : la zone où la charge s'applique sur le palier est la circonférence entre les points M_0 et M_1.</p>	<p>Conclusion :</p>

Représentation de $+\vec{R}_A$ dans la base (\vec{x}_1, \vec{y}_1)	
Pour $\dot{\theta} < \omega_{lim}$	Pour $\dot{\theta} > \omega_{lim}$
 <p>The diagram shows a coordinate system (\vec{x}_1, \vec{y}_1) with origin A. A solid blue circle represents the rotor. A dashed green circle represents the contact zone, which is larger than the rotor. A red vector $+\vec{R}_A$ points from A towards the contact zone. Other vectors shown include $F_0 \cdot \vec{y}_0$ (green), $F_1 \cdot \vec{y}_1$ (blue), and \vec{x}_1 (blue).</p>	 <p>The diagram shows a coordinate system (\vec{x}_1, \vec{y}_1) with origin A and a blue circle representing the rotor. No contact zone is shown.</p>
<p>Conclusion : La zone où la charge s'applique sur le rotor couvre l'intégralité de la circonférence du rotor.</p>	<p>Conclusion :</p>

DR7 (question Q61)

