

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la  
Recherche Scientifique**



**Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**



**Mémoire de fin d'étude**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

**Thème**

Dimensionnement d'une turbine à eau pour  
minimiser l'énergie électrique consommée au niveau  
de la station de déminéralisation d'El Oued

Devant le jury composé de :

**JOGRAB Alaeddine** Président  
**BEN AMOR Afaf** Examinateur  
**MILOUDI Khaled** Encadreur

Présenté par :

- **BENALI Abdelhamid**  
- **DRIHEM Adel**  
- **MEGUIRHI Hamza**

**2019-2020**

# DEDICASSE

*Je dédie ce modeste travail à Mes chers parents qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui et qui m'ont beaucoup apporté toute au long de mon existence, à ma femme qu'a été présent et m'ont toujours soutenu tout au long de ces d'études, et aussi à mes frères et sœur qui m'ont épaulé de quelque façon que ce soit.*

*L'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et de moyens pour me voir réussir dans mes études.*

*A tous mes amis et personnes avec qui j'ai partagé beaucoup de moments agréables et inoubliables, Bachir, Abdellah, Mohieddine, Yucef, Mouad, abderrazek et à tant d'autres que je ne peux pas tous les citer.*

*Et aussi une pensée à tous se qui on fait partie de ma vie à un moment ou un autre.*

**Abedlhamid**

# DEDICASSE

*Je dédie ce modeste travail Aux être les plus chères, mes parents,  
mes frères et sœurs qui ont étaient à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces  
langues années d'études.*

*L'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et de moyens  
pour me voir réussir dans mes études.*

*A tous mes amis avec qui j'ai partagé beaucoup de moments inoubliables.*

# DEDICASSE

*Louanges à Allah le miséricordieux, le très miséricordieux, qui m'a aidé  
tout au long de ma vie, dieu soit loué.*

*Je tiens à dédier ce modeste travail à toutes les personnes qui croient en  
moi, qui m'ont soutenu et m'ont toujours aidé .*

*J'aimerais dédier ce travail à deux personnes qui savent déjà que je les dois  
énormément.*

*À mon père et À ma mère,  
J'espère, sera fier de moi.*

# REMERCIEMENTS

*Nous remercions Dieu de nous avoir donné la force physique et morale pour accomplir ce travail.*

*Nous remercions sincèrement notre encadreur : M. MILOUDI Khaled pour ses aides, ses encouragements et son patience ainsi pour ses conseils précieux pendant la période de la réalisation de ce travail.*

*Nous remercions également tous les membres du jury qui ont accepté de participer à la valorisation de ce travail.*

*Et enfin nous tenons vivement à remercier nos familles et tous nos amis.*

## ملخص

يركز عملنا على تسخير إمكانات الطاقة لطبقة المياه الجوفية البيضاء.

كان التحقيق في نظام طبقة المياه الجوفية في شمال الصحراء، من وجهة نظر الطاقة، أمرًا لا مفر منه لإثبات وجود طاقة وبالتالي إمكانية استخدامها.

لقد رأينا ضخامة هذه الإمكانيات بالإضافة إلى أهمية استخدامها، لا سيما لتقليل استهلاك الطاقة الكهربائية في محطة الوادي لنزع المعادن.

الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة استغلال الطاقة الهيدروليكية الناشئة للآبار الألبانية وكذلك تصميم وحجم جهاز يهدف إلى تحويل هذه الطاقة إلى طاقة كهربائية، من خلال مجموعة التوربينات المولدة.

كان لهذه الدراسة التكاملية تأثير إيجابي على البيئة، وحتى على تشغيل الأشغال العامة، مع الاستفادة من الاكتفاء الذاتي من الطاقة الذي لا يمكن إلا أن يكون مفيدًا.

الكلمات المفتاحية: البين - حفر - توربين - مولد - طاقة - طاقة - هيدروليك - طاقة كهربائية - تبريد - نزع المعادن - الوادي.

## Résumé

Notre travail porte sur l'exploitation du potentiel énergétique de la nappe albienne.

Une enquête sur le Système Aquifère du Sahara Septentrional, du point de vue énergie, a été inévitable pour prouver l'existence d'une énergie et donc la possibilité de son utilisation.

Nous avons constaté l'immensité de ce potentiel ainsi que l'importance de son utilisation surtout dans la minimisation de consommation de l'énergie électrique au niveau de la station de déminéralisation d'El Oued.

L'objectif de ce mémoire est l'étude de l'exploitation de la puissance hydraulique émergente des forages albiens ainsi que la conception et la dimensionnement d'un dispositif destiné à transformer cette énergie en énergie électrique, à travers un groupe turbine - générateur.

Cette étude d'intégration a eu un impact positif sur l'environnement immédiat du forage, et même sur les exploitations des ouvrages de l'état en profitant de l'autosuffisance énergétique qui ne peut être que bénéfique.

**Mots clés:** Albien - Forage - Turbine - Génératrice - Energie- Puissance- hydraulique - Puissance électrique - Refroidissement - déminéralisation - El Oued.

## **Abstract**

Our work focuses on harnessing the energy potential of the albian aquifer.

An investigation of the Aquifer System of the Northern Sahara, from an energy point of view, was inevitable to prove the existence of an energy and therefore the possibility of its use.

We have seen the immensity of this potential as well as the importance of its use, especially in minimizing the consumption of electrical energy at the El Oued demineralization station.

The objective of this dissertation is the study of the exploitation of the emerging hydraulic power of the Albian boreholes as well as the design and sizing of a device intended to transform this energy into electrical energy, through a turbine - generator group.

This integration study had a positive impact on the immediate environment of the drilling and even on the operations of state works by taking advantage of energy self-sufficiency, which can only be beneficial.

**Keywords: Albien - Drilling - Turbine - Generator - Energy - Power - hydraulic - Electric power - Cooling - demineralization - El Oued.**

# Liste de figures

## Chapitre I

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure I.1:</b> zone d'existence de la nappe en Algérie .....   | 4  |
| <b>Figure I.2:</b> capacités de la nappe albien .....  | 4  |
| <b>Figure I.3 :</b> Forage albien Route de Touggourt .....   | 5  |
| <b>Figure I.4 :</b> Principe de fonctionnement des centrales hydroélectriques .....                            | 6  |
| <b>Figure I-5 :</b> Type de turbines en fonction de la hauteur manométrique, de la puissance et du débit ..... | 7  |
| <b>Figure I-6:</b> Schéma de fonctionnement d'une turbine Pelton.....  | 8  |
| <b>FigureI-7:</b> Schéma de fonctionnement d'une turbine Banki-Michelle.....                                   | 9  |
| <b>Figure I-8:</b> Schéma de fonctionnement d'une turbine Francis.....   | 9  |
| <b>Figure I-9:</b> Schéma de fonctionnement d'une turbine Kaplan .....   | 10 |
| <b>Figure I-10:</b> Exemple de conduite d'adduction .....  | 11 |
| <b>Figure I-11:</b> Machine synchrone .....  | 13 |
| <b>Figure I-12:</b> Différents dispositions d'aimants permanents dans un rotor .....                           | 14 |
| <b>Figure I-13:</b> Rotor à pôles lisses.....  | 15 |
| <b>Figure I-14:</b> Rotor à pôles saillants. ....  | 15 |
| <b>Figure I-15</b> Machine synchrone à pôles lisses et machine synchrone à pôles saillants.....                | 16 |
| <b>Figure I-16:</b> Schéma fonctionnel du système d'excitation d'une génératrice synchrone .....               | 18 |
| <b>Figure I-17:</b> Système d'excitation de type DC.....   | 20 |
| <b>Figure I-18:</b> Excitation de type AC avec redresseur non commandé.....                                    | 20 |
| <b>Figure I-19:</b> Excitation type AC avec redresseur commandé.....   | 21 |
| <b>Figure I-20:</b> Système d'excitation de type Brushless.....  | 21 |
| <b>Figure I-21:</b> Excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension.....                      | 22 |
| <b>Figure I-22:</b> Système d'excitation munie de circuits de protection .....                                 | 23 |
| <b>Figure I-23:</b> Schéma de stabilisation et régulation de l'excitation.....                                 | 24 |
| <b>Figure I-24:</b> Schéma du compensateur de charge.....  | 25 |

## Chapitre II

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure II. 1:</b> Enroulements d'une machine synchrone triphasée (repère abc). ....  | 28 |
| <b>Figure II. 2:</b> Schéma de la machine synchrone en diphasé (référentiel dq0). ....  | 29 |
| <b>Figure II.3:</b> Circuits électriques équivalents de la génératrice synchrone triphasée dans le repère de Park (en pu). .... | 32 |
| <b>Figure II. 4:</b> Illustration des entrées-sorties du modèle hybride de la génératrice. ....                                 | 33 |
| <b>Figure II 5:</b> Schéma fonctionnel des états (flux).....  | 35 |
| <b>Figure II. 6:</b> Schéma fonctionnel des sorties ( $\Psi_s, V_s$ ). ....   | 35 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure II.7:</b> Principe de la régulation de tension dans un groupe turbine-alternateur[7][8][29][30]. ... | 37 |
| <b>Figure II.8:</b> Système d'excitation type ST1 de IEEE. ....  | 38 |
| <b>Figure II.9:</b> Régulation et stabilisation de la tension d'excitation. ....                               | 38 |
| <b>Figure II.10:</b> Régulation de la tension de sortie de la génératrice.....                                 | 39 |
| <b>Figure II.11:</b> Schéma fonctionnel d'un correcteur PID classique.....                                     | 39 |
| <b>Figure II.12:</b> Schéma de régulation de tension simplifié. ....   | 40 |
| <b>Figure II.13:</b> Principe de la régulation de la vitesse.....  | 44 |
| <b>Figure II.14:</b> Régulateur de vitesse type PID .....  | 44 |
| <b>Figure II.15:</b> Schéma bloc du Servomoteur .....  | 45 |
| <b>Figure II.16:</b> Système d'excitation type ST1 avec PSS .....  | 45 |
| <b>Figure II.17:</b> Stabilisateur de puissance de type IEEE PSS 1A .....                                      | 46 |
| <b>Figure II.18:</b> Schéma de la régulation globale .....   | 46 |

### Chapitre III

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure III.1:</b> Schéma globale de système.....  | 48 |
| <b>Figure III.2 :</b> Régulation de la tension sortie de génératrice. ....                         | 51 |
| <b>Figure III.3:</b> Tension sortie AVR Vfd.....   | 51 |
| <b>Figure III.4:</b> Tension à la borne de la charge Vf.....                                       | 51 |
| <b>Figure III.5:</b> Tension terminale $V_t$ ( $V_s$ ).....  | 52 |
| <b>Figure III.6:</b> Représentation schématique du système global (Génératrice + Excitation). .... | 53 |
| <b>Figure III.7:</b> Courant d'entre $I_{abc}$ . ....  | 53 |
| <b>Figure III.8:</b> Courant d'entre $I_s$ . ....  | 53 |
| <b>Figure III.9:</b> Vecteur courant au rotor $I_r$ . ....   | 54 |
| <b>Figure III.10:</b> Vecteur tension au stator $V_s$ .....  | 54 |
| <b>Figure III.11:</b> Tension de sortie de la génératrice $V_{abc}$ .....                          | 54 |
| <b>Figure III.12:</b> Flux statorique modèle hybride $\Phi_{s}$ . ....                             | 55 |
| <b>Figure III.13:</b> flux rotorique modèle hybride $\Phi_{r}$ . ....                              | 55 |
| <b>Figure III.14:</b> Schéma de la régulation globale.....   | 56 |
| <b>Figure III.15:</b> Tension de stabilisation $V_{stab}$ .....                                    | 56 |
| <b>Figure III.16:</b> Régulateur de vitesse type PID. ....   | 57 |
| <b>Figure III.17:</b> Sortie régulateur variation de vitesse ( $dw$ ).....                         | 57 |
| <b>Figure III.18:</b> Vitesse rotation de la turbine $W$ . ....                                    | 58 |
| <b>Figure III.19:</b> Puissance mécanique de la turbine $P_m$ .....                                | 58 |
| <b>Figure III.20:</b> Vannage de la vanne $g$ .....  | 58 |
| <b>Figure III.21:</b> Débit d'eau $q$ . ....   | 59 |
| <b>Figure III.22:</b> Couple mécanique de la turbine $T_m$ . ....                                  | 59 |
| <b>Figure III.23:</b> Couple électrique $T_e$ . ....   | 59 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure III.24:</b> Puissance réactive Q.....  | 60 |
| <b>Figure III.25:</b> Puissance active P. ....   | 60 |
| <b>Figure III.26:</b> Variation vannage g avant et après la variation de la pression.....                | 61 |
| <b>Figure III.27:</b> Variation tension sortie PSS Vstab avant et après la variation de la pression..... | 61 |
| <b>Figure III.28:</b> Variation débit q avant et après la variation de la pression. ....                 | 61 |
| <b>Figure III.29:</b> Tension de la charge Vf avant et après l'isolement du PSS. ....                    | 62 |
| <b>Figure III.30:</b> Tension Vabc avant l'isolement du PSS. ....  | 63 |
| <b>Figure III.31:</b> Tension Vabc après l'isolement du PSS.....   | 63 |
| <b>Figure III.32:</b> Tension terminale Vt avant et après l'isolement du PSS.....                        | 63 |
| <b>Figure III.33:</b> Tension sortie AVR Vfd avant et après l'isolement du PSS. ....                     | 64 |
| <b>Figure III.34:</b> Puissance active P avant et après l'isolement du PSS. ....                         | 64 |

## Chapitre IV

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure IV 1:</b> Graphique des caractéristiques. ....  | 67 |
| <b>Figure IV.2:</b> Forme des courbes de rendement de différentes turbines pour des débits..... | 67 |
| <b>Figure IV. 3:</b> Abaque de sélection de différents types de turbines.....                   | 68 |
| <b>Figure IV. 4:</b> Sortie de l'eau sur le refroidisseur.....                                  | 78 |
| <b>Figure IV. 5:</b> conduite d'amener des eau de forage .....                                  | 78 |
| <b>Figure IV. 6:</b> Extracteur d'air chaud du refroidisseur .....                              | 79 |
| <b>Figure IV.7:</b> Schéma type d'équipements de production électrique en réseau connecté.....  | 81 |
| <b>Figure IV.8:</b> Schéma type d'équipements de production électrique en réseau isolé.....     | 82 |

# Liste de tableaux

## Chapitre III

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau III.1:</b> Paramètres de la génératrice synchrone.....           | 49 |
| <b>Tableau III.2:</b> Paramètres du système d'excitation statique ST1. .... | 50 |
| <b>Tableau III.3:</b> Paramètres de la turbine hydraulique [7].....         | 50 |

## Chapitre IV

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau IV. 1:</b> comparatif pour les trois principaux types de turbines..... | 66 |
|---|----|

## *Liste des symboles*

|                              |              |   |
|------------------------------|--------------|---|
| ST                           |              | Statique                                    |
| AC                           |              | Courant alternatif                          |
| DC                           |              | Courant continu                             |
| AVR                          |              | Régulateur Automatique de tension           |
| PSS                          |              | Stabilisateur de puissance                  |
| $K_f$                        |              | Gain de compensation de l'excitatrice S T   |
| $T_f$                        |              | Constante de temps du compensateur          |
| $K_A$                        |              | Gain de l'amplificateur de l'excitatrice ST |
| $T_A$                        |              | Constante de temps de l'amplificateur       |
| $V_a, V_b, V_c$              | V/pu         | Tensions au stator repère abc               |
| $V_d, V_q$                   | V/pu         | Tensions des amortisseurs d et q            |
| $V_f$                        | V/pu         | Tension de champ                            |
| $i_a, i_b, i_c$              | A /pu        | Courants au stator repère abc               |
| $i_d, i_q$                   | A /pu        | Courants axe d et q                         |
| $i_f$                        | A /pu        | Courant de champ                            |
| $\Psi_a, \Psi_b, \Psi_c$     | Wb/pu        | Flux au stator repère abc                   |
| $\Psi_d, \Psi_q$             | Wb/pu        | Flux axe d et q                             |
| $\Psi_f$                     | Wb/pu        | Flux de champ                               |
| $P(\theta)$                  | -            | Matrice de Park                             |
| $P^{-1}(\theta)$             | -            | Matrice de Park inverse                     |
| $R_s$                        | $\Omega$ /pu | Matrice résistance au stator                |
| $R_r$                        | $\Omega$ /pu | Matrice résistance au rotor                 |
| $r_d = r_q = r_a$            | $\Omega$ /pu | Résistances d'armature axe d et q           |
| $r_f, r_D, r_Q$              | $\Omega$ /pu | Résistances de champ, d'amortisseurs D et   |
| $V_s^{abc}, V_s^{dq0}$       | V            | Vecteurs tension au stator                  |
| $V_r^{abc}, V_r^{dq0}$       | V            | Vecteurs de tension au rotor                |
| $i_s^{abc}, i_s^{dq}$        | A            | Vecteurs courant au stator                  |
| $i_r^{abc}, i_r^{dq0}$       | A            | Vecteurs courant au rotor                   |
| $\Psi_s^{abc}, \Psi_s^{dq0}$ | wb           | Vecteurs flux au stator                     |
| $\Psi_r^{abc}, \Psi_r^{dq0}$ | wb           | Vecteurs flux au rotor                      |
| $\omega_m$                   | rad/s        | Vitesse de synchronisme                     |

|                          |          |  |
|--------------------------|----------|--|
| $\theta$                 | rad      | Angle                                    |
| $L_{ss}, L_{rr}, L_{sr}$ | H        | Matrices des inductances mutuelles       |
| $X_{ss}, X_{rr}, X_{sr}$ | pu       | Matrices des réactances mutuelles        |
| $X_d, X_q$               | pu       | Réactances propres d'axe d et q          |
| $X_{md}, X_{mq}$         | pu       | Réactances de magnétisation d'axe d et q |
| $X_{kfl}$                | pu       | Réactance de kany                        |
| $X_f$                    | pu       | Réactance de fuite                       |
| $V_{sref}$               | V        | Tension de base                          |
| $I_{sref}$               | A        | Courant de base                          |
| $S_{ref}$                | VA       | Puissance de base                        |
| $\omega_{ref}$           | rad/s    | Vitesse de référence                     |
| $Z_{ef}$                 | $\Omega$ | Impédance de base                        |
| H                        | pu       | Constante d'inertie                      |
| $T_M$                    | pu       | Couple mécanique                         |
| D                        | -        | Coefficient d'amortissement              |
| $T_e$                    | pu       | Couple électrique                        |
| $V_s, V_r$               | pu       | Vecteur tension au stator et rotor       |
| $I_s, I_r$               | pu       | Vecteur courant au stator et rotor       |
| $\Psi_s, \Psi_r$         | pu       | Vecteur flux au stator et rotor          |
| $\omega_n$               | pu       | Pulsation propre                         |
| g                        | -        | Vannage                                  |
| q                        | -        | Débit d'eau                              |
| $P_m$                    | -        | Puissance mécanique                      |
| $A_t$                    | -        | Gain de la turbine                       |
| $T_w$                    | s        | Temps d'établissement du débit           |
| nominal                  |          |  |
| $T_a$                    | -        | Constante de temps du servomoteur        |
| $K_a$                    | -        | Gain du servomoteur                      |
| u                        | -        | Commande du servomoteur                  |
| $\alpha$                 | rad      | Angle d'amorçage des thyristors          |
| $K_C$                    | -        | Facteur de rectification de tension      |
| $V_{FD}$                 | pu       | Tension d'excitation                     |
| $K_E$                    | pu       | Gain de l'excitatrice                    |
| $T_E$                    | -        | Constante de temps de l'excitatrice      |

|                            |    |                                     |
|----------------------------|----|-------------------------------------|
| $K_{LR}$                   | -  | Facteur de rectification du courant |
| $V_{Amax}, V_{Amin}$       | pu | Limitation de tension               |
| $T_C, T_{C1}, T_B, T_{B1}$ | -  | Constante de temps du compensateur  |
| $V_{stab}$                 | pu | Tension de stabilisation            |
| $V_{REF}$                  | pu | Tension génératrice de référence    |
| $V_C$                      | pu | Tension corrigée                    |
| $I_{FD}$                   | pu | Courant d'excitation                |
| PID                        | -  | Régulateur classique                |
| $K_P$                      | -  | Gain proportionnel du PID           |
| $K_I$                      | -  | Gain intégral du PID                |
| $K_D$                      | -  | Gain dérivée du PID                 |
| $R_P$                      | -  | Statisme                            |
| $w$                        | pu | Vitesse de rotation                 |
| $w_{ref}$                  | pu | Vitesse de rotation de référence    |
| $\eta_t$                   | -  | rendement de la turbine             |
| $\eta_g$                   | -  | rendement de la génératrice         |

# SOMMAIRE

|                                    |          |
|------------------------------------|----------|
| <b>Introduction générale .....</b> | <b>1</b> |
|------------------------------------|----------|

## **Chapitre I : Généralité sur les centrales hydro-électrique**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Introduction .....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>2. La Nappe de l'Albien en Algérie . .....</b>                                | <b>3</b>  |
| <b>3. Forages albiens à la ville d'El Oued.....</b>                              | <b>5</b>  |
| <b>4. Utilisation des centrales hydroélectriques : .....</b>                     | <b>5</b>  |
| <b>5. Constitution d'une station de transfert d'énergie : .....</b>              | <b>6</b>  |
| <b>5 - 1. Turbines .....</b>   | <b>6</b>  |
| <b>5 - 1 - a Turbine Pelton .....</b>  | <b>7</b>  |
| <b>5 - 1 - b Turbine Crossflow (ou Banki Mitchell) .....</b>                     | <b>8</b>  |
| <b>5 - 1 - c Turbine Francis .....</b>   | <b>9</b>  |
| <b>5 - 1 - d Turbine Kaplan.....</b>   | <b>9</b>  |
| <b>5 - 2. Conduites d'adduction .....</b>  | <b>10</b> |
| <b>5 - 3. Générateurs (moteurs-alternateurs).....</b>                            | <b>11</b> |
| <b>5 - 4. Transformateurs .....</b>  | <b>11</b> |
| <b>5 - 5. Raccordement au réseau .....</b>                                       | <b>12</b> |
| <b>6. Présentation de la machine synchrone ; .....</b>                           | <b>12</b> |
| <b>6 - 1. Constitution.....</b>  | <b>13</b> |
| <b>6 - 2. Types de machines synchrones .....</b>                                 | <b>14</b> |
| <b>6 - 2 - a Machines synchrones à aimants permanents .....</b>                  | <b>14</b> |
| <b>6 - 2 - b Machines synchrones à rotor bobiné .....</b>                        | <b>15</b> |
| <b>6 - 3. Système d'excitation : .....</b>                                       | <b>16</b> |
| <b>6 - 3 - a Exigences d'un système d'excitation ; .....</b>                     | <b>16</b> |
| <b>6 - 3 - b Éléments d'un système d'excitation ; .....</b>                      | <b>18</b> |
| <b>6 - 4. Différents types de système d'excitation.....</b>                      | <b>19</b> |
| <b>6 - 4 - a Système d'excitation à courant continu (DC) .....</b>               | <b>19</b> |
| <b>6 - 4 - b Systèmes d'excitation à courant alternatif (AC) .....</b>           | <b>20</b> |
| <b>6 - 4 - c Systèmes d'excitation statique ; .....</b>                          | <b>22</b> |
| <b>6 - 5. Commande et circuits de protection des systèmes d'excitation .....</b> | <b>23</b> |
| <b>6 - 5 - a Régulateurs AC et DC .....</b>                                      | <b>23</b> |
| <b>6 - 5 - b Circuits de stabilisation d'un système d'excitation, .....</b>      | <b>24</b> |
| <b>6 - 5 - c Stabilisateur de puissance (PSS) ; .....</b>                        | <b>24</b> |
| <b>6 - 5 - d Compensateur de charge ; .....</b>                                  | <b>25</b> |

## **Chapitre II : Modélisation de la génératrice**

|  |    |
|--|----|
| 1. Introduction .....  | 26 |
| 2. Modélisation de la machine synchrone.....                                       | 26 |
| 2 - 1. Modèle génératrices :.....  | 26 |
| 2 - 1 - a. Hypothèses simplificatrices :.....                                      | 26 |
| 2 - 1 - b. Modèle de la génératrice synchrone dans le repère abc ; .....           | 27 |
| 2 - 1 - c. Modèle de la génératrice synchrone dans le repère de Park (dqO) : ..... | 28 |
| 2 - 2. Développement du modèle hybride de la génératrice synchrone : .....         | 33 |
| 2 - 3. Modèle de la turbine hydraulique et servomoteur . .....                     | 36 |
| 2 - 3 - a. Régulateur automatique de tension .....                                 | 37 |
| 2 - 3 - b. Régulation et stabilisation de la tension d'excitation,.....            | 37 |
| 2 - 3 - c. Régulation de la tension de sortie de la génératrice synchrone . .....  | 38 |
| 2 - 3 - d. Régulation de la vitesse de rotation.....                               | 43 |
| 2 - 3 - e. Stabilisateur de puissance. ....  | 45 |
| 3. Conclusion.....   | 47 |

## **Chapitre III : Régulation et simulation de l'ensemble génératrice-turbine**

|  |    |
|--|----|
| 1. Introduction. ....  | 47 |
| 2. Schéma simplifié du turbine-alternateur et du système de commande. ....       | 47 |
| 3. Paramètre des différents blocs.....   | 48 |
| 4. Régulation de la tension d'excitation :.....                                  | 50 |
| 5. Régulation des tensions dans le système global. ....                          | 52 |
| 6. Stabilisation de puissance PSS. ....  | 55 |
| 7. Régulation de la vitesse de rotation et de la puissance mécanique. ....       | 57 |
| 8. Essais d'efficacité du système. ....  | 60 |
| 8 - 1. Essai d'efficacité par la variation pression. ....                        | 61 |
| 8 - 2. Essai d'efficacité par l'isolement de stabilisateur de puissance PSS..... | 62 |
| 9. Conclusion.....   | 65 |

## **Chapitre IV : Optimisation de dimensionnement de central et étude technico-économique**

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 1. Introduction .....                 | 66 |
| 2. La Sélection d'une turbine .....   | 66 |
| 3. Le groupe turbine-générateur ..... | 69 |

|   |           |
|---|-----------|
| 3 - 1. Les générateurs .....  | 69        |
| 3 - 1 - a. Génératrice à courant continu .....  | 69        |
| 3 - 1 - b. Génératrice synchrone .....  | 69        |
| 3 - 1 - c. Génératrice asynchrone.....  | 69        |
| 3 - 2. Les régulateurs .....  | 70        |
| 3 - 3. Vitesse de rotation du groupe turbine - générateur .....   | 70        |
| 4. Choix du type de turbine .....   | 71        |
| 4 - 1. Choix théorique de la turbine.....   | 71        |
| 4 - 2. Eléments de synthèse .....   | 72        |
| 4 - 2 - a. La vitesse de rotation de la roue de la turbine .....  | 72        |
| 4 - 2 - b. Le générateur de courant .....   | 72        |
| 4 - 2 - c. La puissance mécanique .....   | 72        |
| 4 - 2 - d. La puissance électrique .....  | 73        |
| 4 - 2 - e. Le rendement .....   | 73        |
| 4 - 3. Calculer la puissance et l'énergie d'une turbine .....   | 74        |
| 4 - 3 - a. Formule pour calculer la puissance hydroélectrique .....   | 74        |
| 4 - 4. Calcul de la production énergétique hydroélectrique .....  | 74        |
| 4 - 4 - a. Potentiel d'énergie de l'eau.....  | 74        |
| 4 - 4 - b. Pertes de rendement et énergie électrique réellement disponible en sortie de la turbine .....      | 75        |
| 4 - 5. Choix d'un fournisseur .....   | 75        |
| 5. Impacts techniques et économiques par l'intégration de nouveau système .....                               | 76        |
| 5 - 1. Conséquences de l'intégration de la turbine .....  | 76        |
| 5 - 2. Considérations économiques .....   | 77        |
| 5 - 2 - a. Production d'énergie hydro-électrique et gain financier.....                                       | 77        |
| 5 - 3. Impact de l'intégration de la turbine sur les exploitations de l'usine de déminéralisation d'eau ..... | 77        |
| 5 - 4. Impact de l'intégration de la turbine sur l'environnement.....   | 79        |
| <b>6 Résultat d'optimisation de dimensionnement.....</b>  | <b>80</b> |
| <br>  |           |
| <b>conclusion générale .....</b>  | <b>80</b> |
| 1 Perspectives de développement.....  | 81        |
| <b>Bibliographi .....</b>   | <b>85</b> |
| <b>Annexes .....</b>  | <b>87</b> |

# **Introduction générale**

## Introduction générale

L'évolution de la vie a été possible grâce à la présence de l'eau. Cependant, seule une petite portion de cette eau est réellement disponible pour la consommation. Les eaux salées des mers et des océans représentent près de 97 % du volume total d'eau de notre planète, et une grande partie des 3% restants se trouve bloquée (neige, glaciers et eaux souterraines profondes). La quantité d'eau douce sous forme liquide représente environ 0,6 % du volume total d'eau, dont seulement 0,014 % est facilement exploitable en tant qu'eau de surface ou nappes phréatiques peu profondes. [36]

Aussi la consommation d'électricité, qui est en constante augmentation, varie passablement selon les heures (jour/nuit), les jours (semaine/week-end) ou encore les saisons (été/hiver). Or un grand pourcentage de la production, appelé production de base, est assuré par des centrales thermiques, nucléaires ou encore au fil de l'eau qui ne sont techniquement exploitables qu'à puissance quasiment constante. Il s'avère donc nécessaire de pouvoir stocker l'énergie électrique de manière à couvrir les multiples fluctuations de la demande. En outre, le développement des énergies renouvelables et plus particulièrement la multiplication des sites éoliens importants, dont la production varie fortement suivant les conditions de vent, nécessite des capacités de stockage de plus en plus considérables.

Couvrant une superficie de 600 000 km<sup>2</sup> et renfermant 50 000 Milliards de m<sup>3</sup> d'eau en réserve, elle a été présentée dans les années soixante comme la solution définitive à l'aridité et au sous-développement de la région. [37]

Indiscutablement, le Continental Intercalaire est un atout pour le développement économique du Sahara algérien surtout dans les régions où il est peu profond et jaillissant.

L'apparente facilité de mobilisation de ces eaux ne doit pas faire oublier qu'elles sont aussi précieuses que celles d'un barrage, tout en sachant que ce dernier peut très bien se vider entre deux séries d'années pluvieuses. Dans le cas du CI, la régulation est

à l'échelle géologique, mais la partie utilisable économiquement est localement comptée.

Cependant, l'eau de cette nappe n'est pas exploitée d'une manière rationnelle. Nous ne savons d'ailleurs même pas combien coûte réellement le mètre cube d'eau sortant d'un forage albien.

L'eau qui sort de cette nappe est très gourmande en énergie. Il lui faut un moteur fonctionnant à une soixante-quinze de Kilowatt pour permettre une utilisation directe. Et pourtant l'énergie dégagée de cette eau jaillissante du forage n'est pas à sous-estimer d'autant plus qu'on la perd déjà au départ.

C'est dans cette optique que nous avons orienté notre étude afin de profiter des bienfaits de cette eau et, mieux encore, exploiter son potentiel énergétique.

Nous sommes en train de gaspiller une eau précieuse, essayons au moins sans nuire au fonctionnement actuel, de soustraire le maximum d'énergie du peu que nous pouvons, afin de mieux valoriser l'exploitation de l'usine de déminéralisation d'eau avec cette énergie.

Dans ce travail, nous sommes intéressés aux centrales hydroélectriques, utilisant une machine synchrone.

Le premier chapitre est consacré à la présentation de la région d'étude et des généralités sur les centrales à hydro-électrique, on a commencé par la présentation de la centrale, ces différentes parties et les domaines d'utilisation.

Dans le deuxième chapitre nous présentons la modélisation du moteur synchrone, ainsi sa commande en puissance. Puis nous établissons la modélisation des bus continu.

Au troisième chapitre, nous présentons les résultats de simulation de mode turbinage.

Et dans le quatrième chapitre nous allons présenter une optimisation de dimensionnement et l'étude technique-économique de ce système.

Enfin, nous présentons une conclusion générale et quelques perspectives.

# **Chapitre I :** **Généralité sur les centrales** **hydro-électrique**

## 1 Introduction

Le présent chapitre est consacré à la présentation d'un aperçu sur la zone d'étude et production d'énergie électrique d'origine hydraulique. Où on va citer les domaines d'utilisation des centrales, leurs constitutions et enfin des généralités sur les moteur synchrones et le mode d'excitation.

## 2 La Nappe de l'Albien en Algérie :

La Nappe de l'Albien se trouve en grande partie dans le Sahara algérien, elle est la plus grande réserve d'eau douce au monde. Elle contient plus de 50 000 milliards de mètres cubes d'eau douce, l'équivalent de 50 000 fois le barrage de Beni Haroun qui se trouve à l'est du pays et qui alimente six wilayas limitrophes.

Avec une pluviométrie quasi nulle, le sud de l'Algérie, représentant quelque 70% de la superficie totale du pays, est exclusivement alimenté en eau à partir de réserves souterraines sous formes de nappes qui servent à la fois l'irrigation agricole, l'industrie ou l'alimentation des populations locales en AEP.

La première est la nappe phréatique localisée à une profondeur proche de la surface, soit à moins de 100 mètres généralement et se recharge avec les eaux superficielles, pluviales ou usées. Néanmoins, cette nappe est d'une moindre utilité en raison de son fort taux de salinité. Les eaux provenant de la nappe phréatique sont même déconseillées en agriculture compte tenu des sels qu'elles drainent à la surface en anéantissant la fertilité des terres.

La seconde réserve, la plus importante, est la nappe albienne ou l'aquifère du Sahara septentrional. Selon Fabienne Lemarchand, Docteur en sciences de la terre et ayant mené durant sa carrière de multiples études sur les potentialités du sous-sol africain, cette réserve « s'étend sur plus d'un million de km<sup>2</sup> sous l'Algérie, la Tunisie et la Libye. Elle recèle environ 31 000 milliards de m<sup>3</sup> (mètres cubes) d'eau.

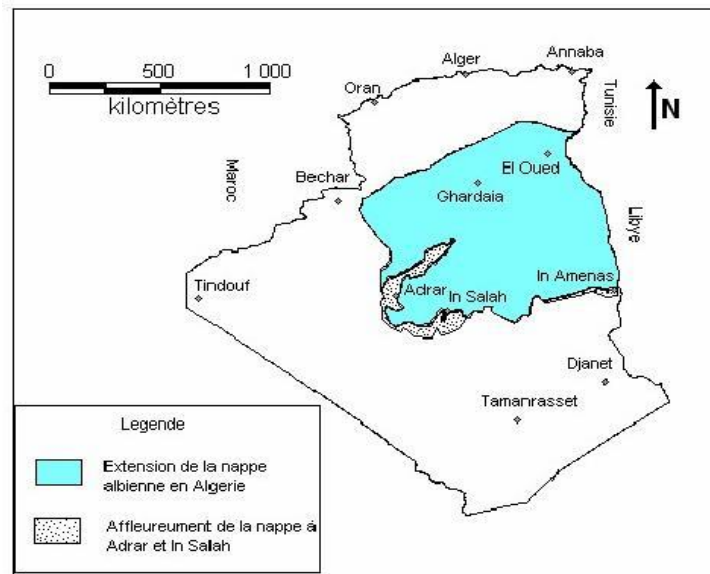


Figure I.1: zone d'existence de la nappe en Algérie

À titre de comparaison, la nappe souterraine de l'Albien, qui occupe environ 100 000 km<sup>2</sup> sous le Bassin de Paris, n'en renferme que 425 milliards de m<sup>3</sup> ». Aussi importantes soient-elle, leur exploitation effrénée et non maîtrisée de ces réserves semble inquiéter davantage les chercheurs et spécialistes en la matière. Car, comme le confirme cette spécialiste du Sahara, « exploitée depuis plus d'un siècle, la nappe albienne du sud du Maghreb est à l'origine du développement urbain et agricole de la région, en particulier des villes de l'Atlas saharien ».

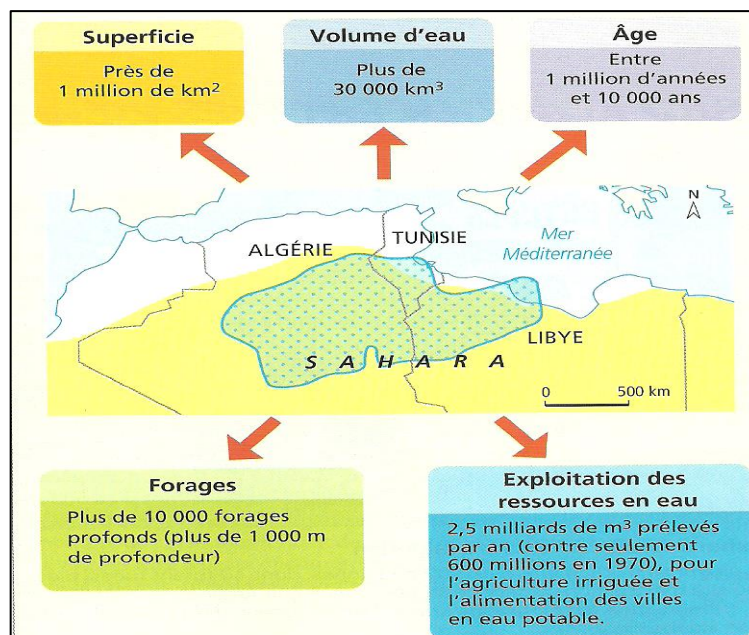


Figure I.2: capacités de la nappe albien

### 3 Forages albiens à la ville d'El Oued

La ville d'El Oued est déjà propriétaire des 04 forages albiens situent sur le chef-lieu de Wilaya, La station de déminéralisation d'El Oued d'une capacité de traitement de 30 000 m<sup>3</sup>/jour qui fait traité l'eau qui vient de ces 04 forages albiens de débit de 540 m<sup>3</sup>/heure pour chacun, ces forages sont comme suite forage CHOUHADAA, ROUTE TOUGGOURTE, 18 FEVRIER et 19 MARS après avoir amené ces forages à la station (voir la figure I.3).



*Figure I.3 : Forage albien Route de Touggourt*

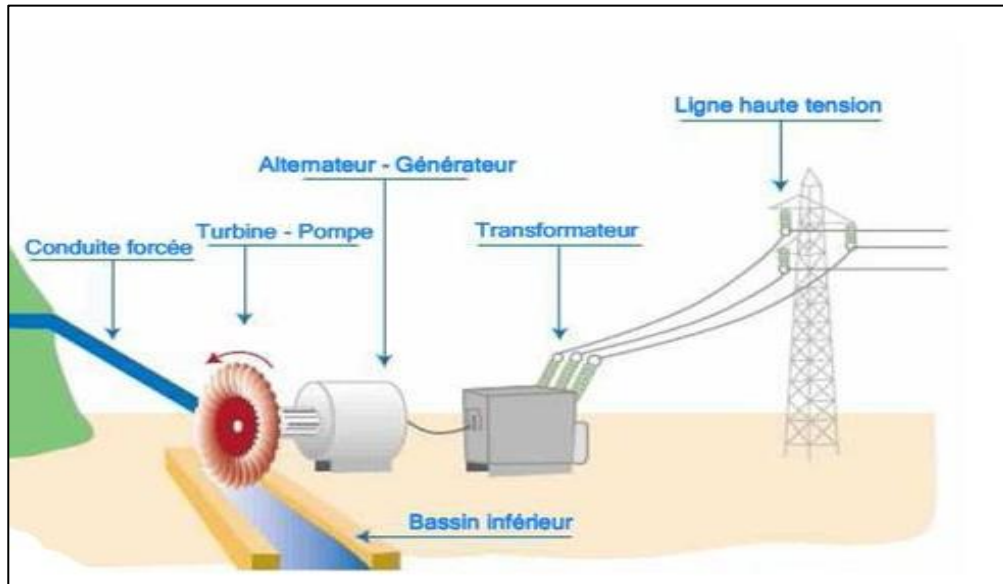
Avec le débit important qui vient par ces forages au niveau de la station de déminéralisation nous avons remarqué que la pression est aussi importante est de 5 bar aussi ces forages se réagirent comme une pompe qui a un point de fonctionnement bien déterminé.

### 4 Utilisation des centrales hydroélectriques :

Elles sont actuellement utilisées de façons différentes par le gestionnaire du réseau en tant que réserves d'énergie pour :

- Contribuer à produire l'énergie électrique au coût minimum ;
- Lisser la courbe de production journalière d'énergie (effacement des heures de pointe) ;

- Gérer de façon saisonnière la consommation d'énergie hydraulique ;
- Participer au niveau tertiaire rapide d'intervention en cas de décrochage sur défaut du réseau de transport de l'énergie électrique.



*Figure I.4 : Principe de fonctionnement des centrales hydroélectriques*

## 5 Constitution d'une station de transfert d'énergie :

### 5 - 1 Turbines

Une turbine hydraulique est une machine tournante, constituée principalement d'une roue à aubes, qui reçoit de l'énergie d'un fluide, sous forme d'énergie de pression ou d'énergie cinétique et qui la transforme en énergie mécanique directement utilisable sur un arbre en rotation.

Le rendement des turbines se situe généralement entre 60 et 80 % ; il croit avec la taille des roues.

Il existe plusieurs types de turbines dont le choix est fonction de la hauteur de chute et du débit de site sélectionné pour l'installation d'une centrale.

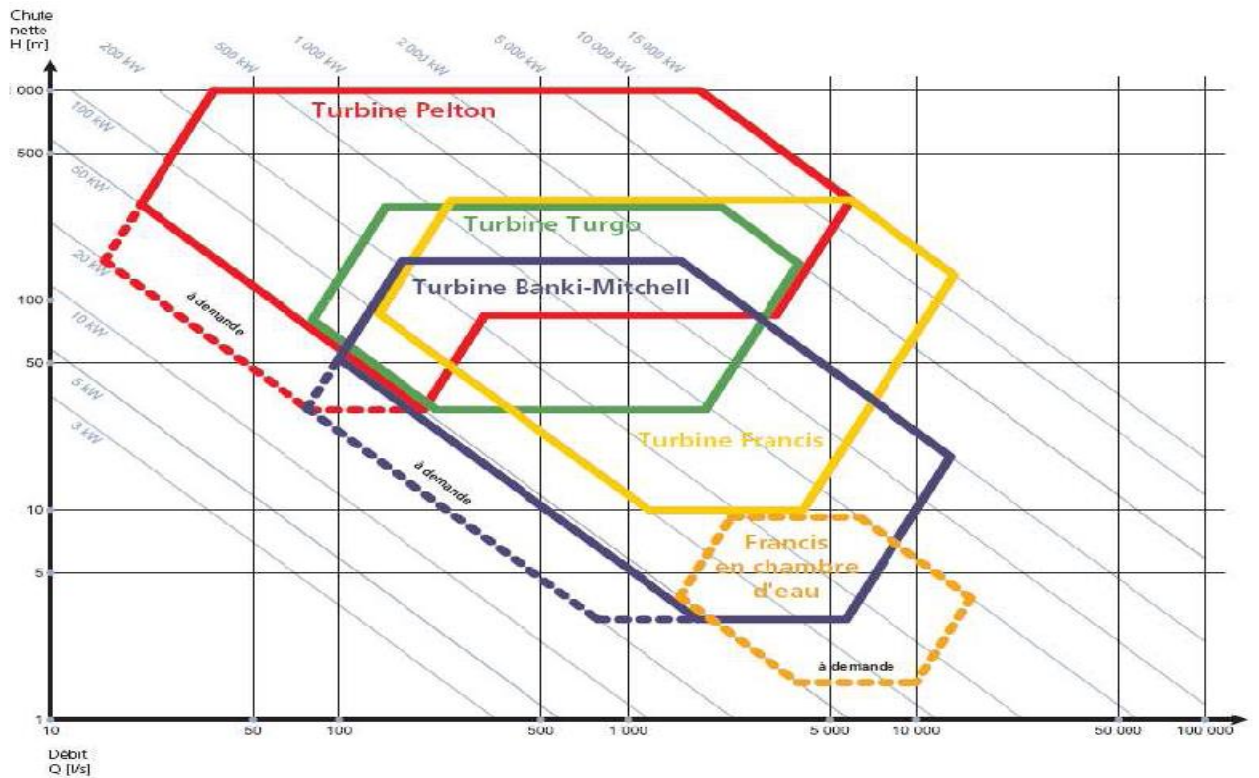
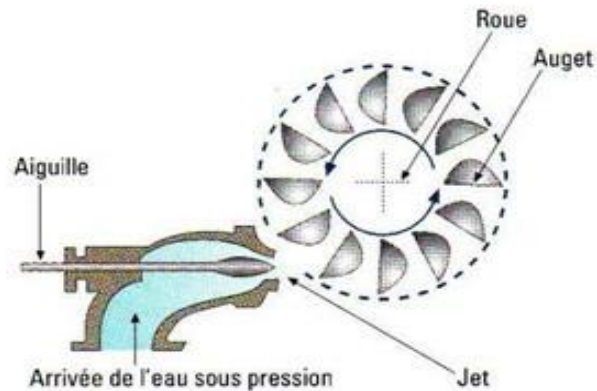


Figure I-5 : Type de turbines en fonction de la hauteur manométrique, de la puissance et du débit

### 5 - 1 - a Turbine Pelton

La turbine Pelton est constituée par une roue à augets qui est mise en mouvement par un jet d'eau provenant d'un injecteur. Les augets sont profilés pour obtenir un rendement maximum tout en permettant à l'eau de s'échapper sur les côtés de la roue.

La vitesse nominale de la turbine varie de 500 tr/min à 1500 tr/min, ce qui permet un couplage direct sans multiplicateur à la génératrice électrique. [35]



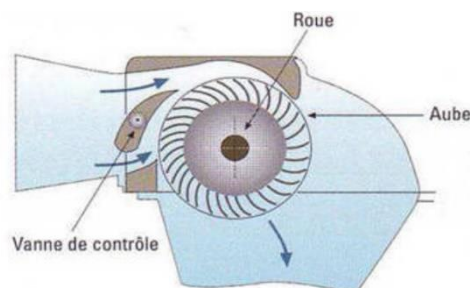
*Figure I-6: Schéma de fonctionnement d'une turbine Pelton.*

### 5 - 1 - b Turbine Crossflow (ou Banki Mitchell)

La turbine Crossflow, appelé aussi turbine à flux traversant, est une machine à action qui a ceci de particulier que l'eau traverse deux fois la roue [35]. De construction simple, elle est constituée de trois parties principales :

- Un injecteur de section rectangulaire et dont le débit est réglé à l'aide d'une aube profilée rotative, similaire à une vanne papillon ;
- Une roue en forme de tambour, dotée d'aubes cylindriques profilées ;
- Un bâti enveloppant la roue et sur lequel sont fixés les paliers de la turbine.

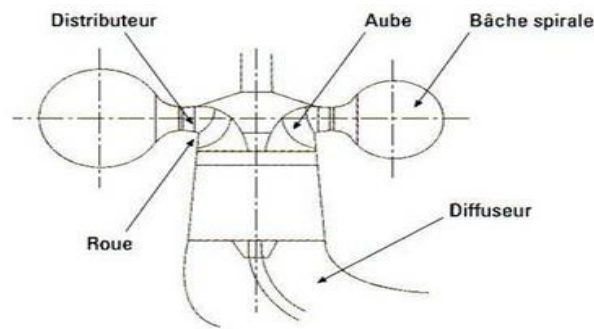
En général sa vitesse de rotation est faible, ce qui justifie l'emploi d'un multiplicateur pour la coupler à une génératrice ou bien d'utiliser des machines avec un nombre de pôles important.



*Figure I-7: Schéma de fonctionnement d'une turbine Banki-Michelle*

### 5 - 1 - c Turbine Francis

La turbine Francis est utilisée pour des faibles variations de débit (débits moyens entre 100 l/s et 6000 l/s). Elle s'adapte bien aux chutes moyennes de 10m à 100m. Elle a un bon rendement et une vitesse de rotation élevée (1000 tr/min).[35]



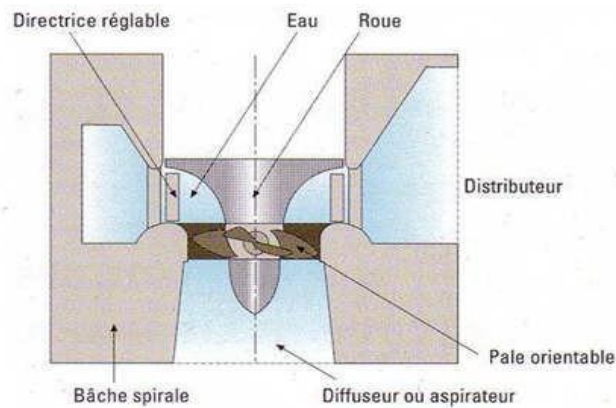
*Figure I-8: Schéma de fonctionnement d'une turbine Francis*

### 5 - 1 - d Turbine Kaplan

Les turbines Kaplan (ou turbines hélice) sont les turbines les mieux adaptées pour les faibles chutes (environ 2m) et des débits importants de l'ordre de 300 (l/s) à 15000 (l/s). Elles conviennent bien pour des débits variables et leur rendement est bon (84-90% maximum) en dépit d'une vitesse de rotation faible. [35]

La roue de la turbine Kaplan est semblable à une hélice de bateau et les pâles sont orientables pour optimiser le coefficient de rendement  $h_t$  de la turbine.

La turbine Kaplan offre une analogie intéressante avec les turbines éoliennes sur l'aspect du réglage de l'orientation des pâles.



*Figure I-9: Schéma de fonctionnement d'une turbine Kaplan*

Les couts de turbines dépendent à la fois de la puissance mais aussi du modèle de turbine utilise. Dans le cadre de notre outil, le cout des turbines comprend la turbine en elle-même et le générateur associe.

### **5 - 2 Conduites d'adduction**

Les conduites forcées des petites centrales sont réalisées avec des tuyaux standards disponibles sur le marché pour d'autres applications (eau potable et eaux usées).

Le choix du matériau des tuyaux est essentiellement fonction de la chute (ou pression) et du diamètre de la conduite. Les tuyaux pour canalisations en plastique ou fibrociment sont utilisables pour les faibles hauteurs, jusqu'à 10 ou 20 m. Jusqu'à 140 m de chute (pression 14 bars) et pour des faibles diamètres (200 mm ou moins), le plastique, PVC, PE ou polyester, présente de multiples avantages, en particulier du point de vue du prix et de la résistance à la corrosion. Pour des pressions plus élevées et des conditions de terrain difficiles, le choix se limite aux tuyaux en fonte, qui ont fait leurs preuves dans l'approvisionnement en eau, ou en acier inox.

Les conduites forcées des petites centrales récentes sont généralement enterrées, ce qui permet de préserver le paysage.



*Figure I-10: Exemple de conduite d'adduction*

### **5 - 3 Générateurs (moteurs-alternateurs)**

La puissance mécanique est transformée en puissance électrique par un générateur électrique. Il est mis en rotation par la turbine; en général par un accouplement direct ou par un système de transmission.

Les générateurs asynchrones sont généralement utilisés en réseau autonome, pour des unités de grande puissance, souvent supérieure à 2 000 kW, raccordés au réseau national. [33]

Les générateurs synchrones, quant à eux, sont essentiellement utilisés lorsque la production de la centrale est prévue pour une vente, car dans ce cas, la génératrice est pilotée par le réseau qui régule la fréquence et la tension du courant produit. Ils sont utilisés pour des puissances inférieures à 2 000 kW.

### **5 - 4 Transformateurs**

Les transformateurs sont des appareils extrêmement divers, par leur fonction, mais aussi par leur taille et leur coût.

Les deux grandes catégories sont les transformateurs de puissance et les transformateurs de mesure.

Les transformateurs de puissance sont indispensables quand la centrale doit débiter sur un réseau de tension 20 kV ou plus.

### **5 - 5 Raccordement au réseau**

Pour les installations hydroélectriques d'une puissance inférieure à 250kW, le raccordement se fait sur le réseau moyenne ou basse tension. [33]

Les caractéristiques d'un raccordement au réseau basse tension sont les suivantes:

- Le point de raccordement doit être à proximité de l'installation ;
- Un système de protection réseau est obligatoire ;
- Un dispositif de comptage pour l'énergie fournie et l'énergie consommée par l'installation hydraulique doit être installé.

Le cout d'un raccordement au réseau est fonction de la distance de ce dernier par rapport à l'installation de stockage.

### **6 Présentation de la machine synchrone ;**

Les machines synchrones sont des machines réversibles, elles peuvent fonctionnées comme moteurs et générateurs. Elles sont dites synchrones par rapport à l'égalité de la vitesse de rotation du champ tournant du rotor à la vitesse du synchronisme. Pour obtenir un tel fonctionnement, le rotor de la machine doit être excité ou bien conçu avec des aimants permanents. De telles machines sont généralement combinées avec des turbines pour concevoir des turbo-alternateurs à la production d'énergie électrique, Figure .12.



*Figure I-11: Machine synchrone*

## 6 - 1 Constitution

Les grandeurs des machines varient de quelques Watts pour les petits moteurs à plusieurs centaines de mégawatts pour les alternateurs de grande puissance.

Elles sont constituées de deux parties principales, l'induit et l'inducteur qui sont séparés par un entrefer cylindrique. L'induit (rotor) est constitué d'électro-aimant alimenté en courant continu ou d'un aimant permanent. Ces rotors sont de type à pôles lisses ou à pôles saillants, qui sont généralement unipolaire ou bipolaire, tournant à des grandes vitesses pour les générateurs à pôles lisses, et pour ceux à plusieurs pôles elles tournent plus lentement comme dans les centrales hydrauliques.

L'inducteur (stator) porte trois enroulements identiques décalés de  $2\pi/3$  radians les uns par rapport aux autres. Les conducteurs de ces enroulements sont logés dans des encoches à la périphérie du stator, pour les petites machines et des barres en cuivre pour les grosses machines. Elles ont aussi deux enroulements amortisseurs de chaque côté, reliés par des conducteurs de faible résistance.

## 6 - 2 Types de machines synchrones

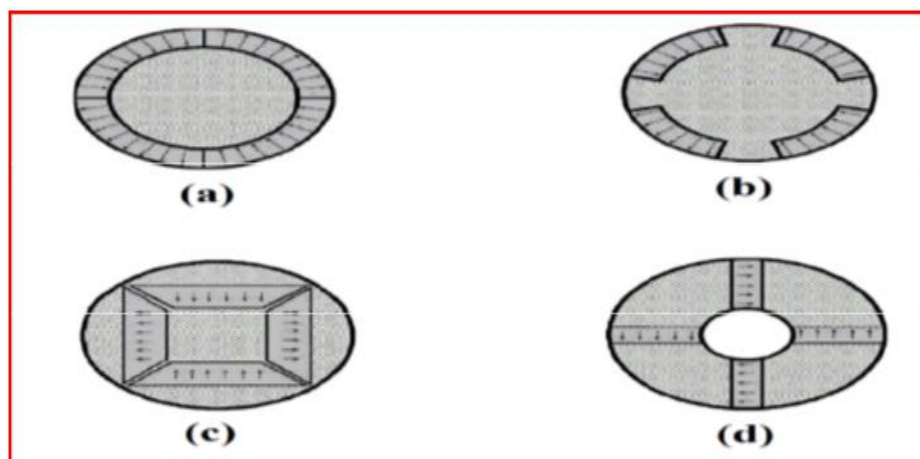
On trouve dans la grande majorité des applications à vitesse variable, trois catégories de machines synchrones qui sont :

### 6 - 2 - a Machines synchrones à aimants permanents

Elles sont de plus en plus employées depuis une dizaine d'années avec l'apparition d'aimants rigides performants (ferrites, terres rares-cobalt et, plus récemment, néodyme-fer-bore). L'utilisation des aimants pour l'excitation des machines synchrones a été d'abord limitée à la réalisation de machines de faible alésage. Actuellement, l'augmentation de la taille de ce type de machines est sérieusement envisagée. En effet, à condition de coupler cette augmentation de taille avec une augmentation du nombre de pôles, l'utilisation des aimants reste avantageuse.

Des réalisations particulièrement intéressantes commencent à voir le jour dans le domaine des moyennes et fortes puissances (100 kW et plus), à des vitesses faibles (quelques centaines de tours par minute). Les machines synchrones à aimants présentent, en fonctionnement, des pertes au rotor faibles, mais leur inconvénient principal provient de l'absence de possibilité de réglage du flux d'excitation.

La figure 13 nous décrit les différentes conceptions des machines synchrones à aimants permanents.



*Figure I-12: Différents dispositions d'aimants permanents dans un rotor*

### 6 - 2 - b Machines synchrones à rotor bobiné

Ces machines font appel, le plus souvent, à une excitatrice associée à un redresseur tournant, pour éliminer tout contact glissant. Le rotor peut être à pôles lisses ou saillants et il est généralement équipé de circuits amortisseurs. Pour certaines applications à forte puissance et à grande vitesse (30 MV et 30 000 tr/min par exemple), on utilise un rotor cylindrique massif.

- **Rotor à pôles lisses** : Ce sont les rotors des alternateurs de centrales nucléaires ou thermiques. Il peut tourner à des vitesses importantes (3000tr/min). Ils sont généralement bipolaires ( $p= 1$ ) ou tétra-polaire ( $p=2$ ), Figure 14.

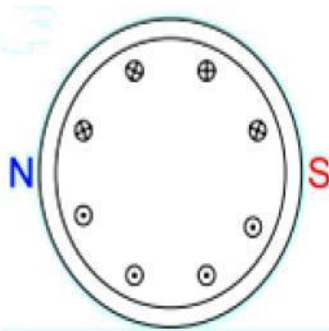


Figure I-13: Rotor à pôles lisses.

- **Rotor à pôles saillants** : Ce sont les rotors des machines fonctionnant dans les centrales hydrauliques. Ils tournent plus lentement mais il comporte un grand nombre de pôles (exemple : 40 pôles ;  $p= 20$ ), Figure 15.

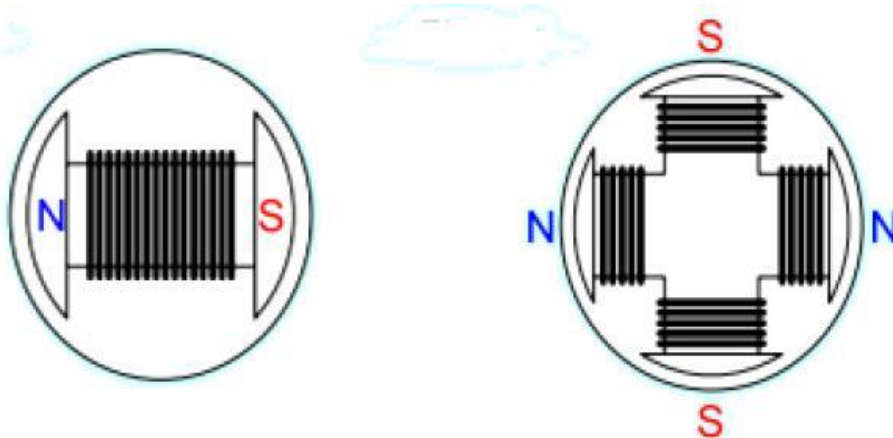
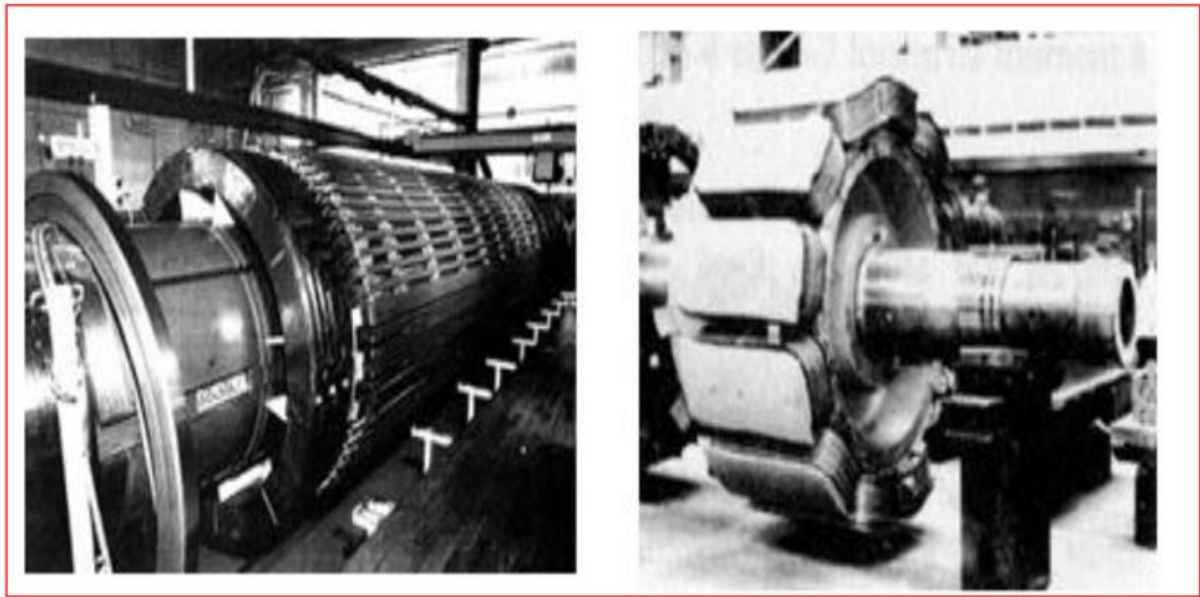


Figure I-14: Rotor à pôles saillants.



*Figure I-15 Machine synchrone à pôles lisses et machine synchrone à pôles saillants*

## **6 - 3 Système d'excitation :**

### **6 - 3 - a Exigences d'un système d'excitation ;**

Les exigences de performances d'un système d'excitation sont principalement déterminées par la génératrice synchrone et aussi le circuit d'alimentation. La condition de base est que le système d'excitation doit ajuster le courant de champ afin d'exciter la génératrice synchrone et maintenir la tension de sortie selon la consigne. La fonction de base de l'excitation est alors de fournir le courant continu aux bobines créant un champ au rotor de la machine synchrone ; de plus, l'excitation assure le contrôle de la tension et de la puissance réactive, ainsi que certaines fonctions protectrices du réseau (respect des limites des machines), le tout par le biais de la tension d'excitation.

D'un point de vue d'installation électrique, le système d'excitation devrait contribuer au contrôle efficace de la tension et à l'amélioration de la stabilité du système. Cela implique aussi le maintien de la stabilité transitoire en cas de perturbations et de faibles signaux.

Historiquement, le rôle du système d'excitation dans l'amélioration des Performances du système de production n'a pas cessé de se développer.

Auparavant, les systèmes d'excitation intervenaient manuellement dans la régulation et le maintien constant de la tension et la puissance réactive en sortie des génératrices. Quand le contrôle de la tension génératrice a été automatisé la première fois, il était lent. Au début des années 1920, l'intégration des régulateurs continus dans les systèmes d'excitations a contribué dans le développement de ceux-ci, permis d'obtenir de meilleurs résultats, et suscité l'intérêt d'un grand nombre d'industriels. Depuis ce moment, le système d'excitation a connu une évolution continue. À partir des années 1960, l'importance et le rôle du système d'excitation ont été élargis en utilisant des signaux de stabilisation auxiliaires. En plus de la régulation de tension de sortie, l'excitation permettait d'amortir les oscillations de puissance du système à l'aide de stabilisateur de puissance (*power system stabilizer*). Les systèmes d'excitation modernes sont actuellement capables de fournir une réponse pratiquement instantanée même avec des tensions élevées (HT).

Pour remplir son rôle de manière satisfaisante, le système d'excitation doit répondre aux exigences suivantes :

- Respecter les critères souhaités du cahier de charge.
- Fournir les limitations nécessaires afin d'assurer la protection de l'excitatrice, elle-même, de la génératrice, et des autres équipements (turbine, réseau, ... etc).
- Respecter les exigences tout en assurant une flexibilité d'opération (régulation, stabilisation, ... etc)
- Assurer la fiabilité et la validité des équipements.

### 6 - 3 - b Éléments d'un système d'excitation ;

Le schéma ci-dessous (Figure 17) représente les différentes parties et les éléments d'un système d'excitation appliqué pour les génératrices synchrones.

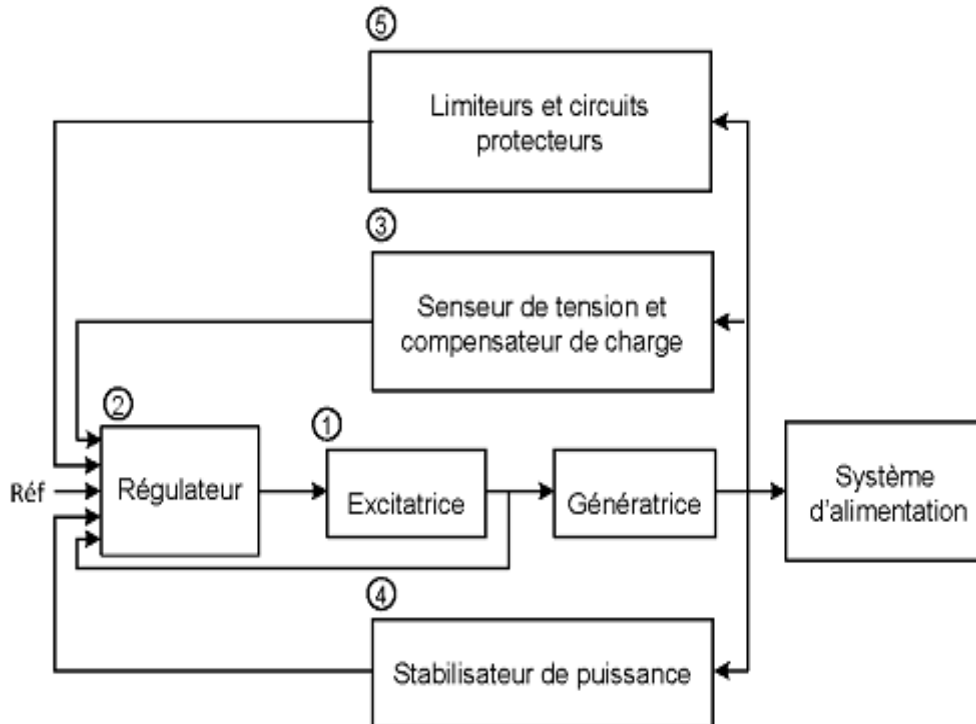


Figure I-16: Schéma fonctionnel du système d'excitation d'une génératrice synchrone

- **L'excitatrice** : fournit la puissance aux bobines qui créent le champ au rotor. Typiquement, un générateur d'une puissance de 600MW nécessite une excitatrice d'environ 1MW.
- **Le régulateur** : permet de contrôler et stabiliser le signal d'entrée de l'excitatrice.
- **Le senseur de tension** : mesure la tension aux bornes de la machine, le filtre et la redresse en une valeur continue. Ensuite, cette mesure est comparée à la référence (tension voulue aux bornes de la machine).
- **Le compensateur de charge** : est un élément additionnel et facultatif qui permet de conserver une tension constante en un point particulier distant des bornes de la machine.

- **Le stabilisateur de puissance (PSS)** : il fournit un signal d'entrée additionnel au régulateur du système d'excitation afin d'amortir les oscillations de puissance à basse fréquence du réseau électrique.
- **Les limiteurs et les circuits protecteurs** : sont toute une gamme de moyens qui s'assurent que les limites du circuit d'excitation et du générateur ne sont pas outrepassées. Par exemple, limitation du courant d'excitation, limiteur de surexcitation, limiteur de tension et limiteur de sous-excitation.

### 6 - 4 Différents types de système d'excitation

Dépendamment de la source d'alimentation, les systèmes d'excitations pour les génératrices synchrones se distinguent selon trois types essentiels :

- ✓ Systèmes d'excitation à courant continu (DC)
- ✓ Systèmes d'excitation à courant alternatif (AC)
- ✓ Systèmes d'excitation statiques

Dans cette section, ces différents types d'excitation seront décrits, suivant la forme et la structure générale de chaque.

#### 6 - 4 - a Système d'excitation à courant continu (DC)

Cette catégorie d'excitation utilise une machine à courant continu comme source d'excitation, fournissant le courant au niveau du rotor de la génératrice synchrone à travers des bagues collectrices. La machine à courant continue est entraînée par un moteur de l'arbre de la génératrice, et peut être soit auto-excitée, soit excitée séparément.

L'excitation à courant continu est la première utilisée de l'année 1920 jusqu'en 1960 où elle a été remplacé par l'excitation de type AC. Actuellement, ce type d'excitation est rarement utilisé pour fin d'étude de la stabilité car il exige une modélisation complexe. Il est souvent remplacé par l'excitatrice de type AC ou l'excitatrice statique ST.

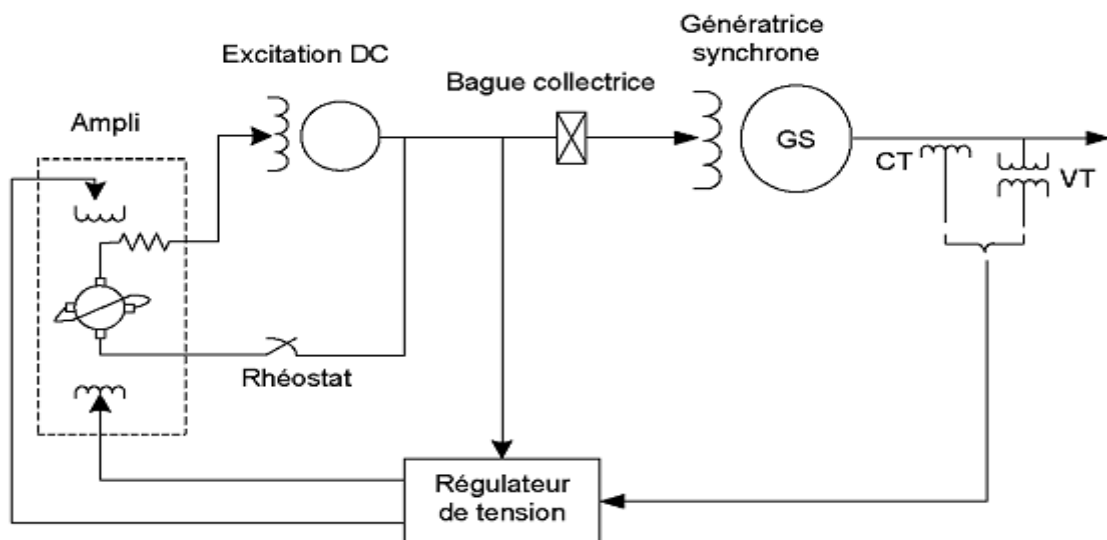


Figure I-17: Système d'excitation de type DC.

#### 6 - 4 - b Systèmes d'excitation à courant alternatif (AC)

L'excitatrice à courant alternatif utilise un alternateur associé à un redresseur stationnaire ou tournant pour produire le courant de champ excitant la machine synchrone, le redresseur utilisé peut

Aussi être soit commandé ou non. Dans le cas d'un redresseur non commandé, le réglage s'effectue sur les enroulements de champs au niveau de l'excitatrice AC.

Les figures 19 et 20 montrent l'excitatrice de type AC muni d'un redresseur stationnaire non commandé et commandé respectivement.

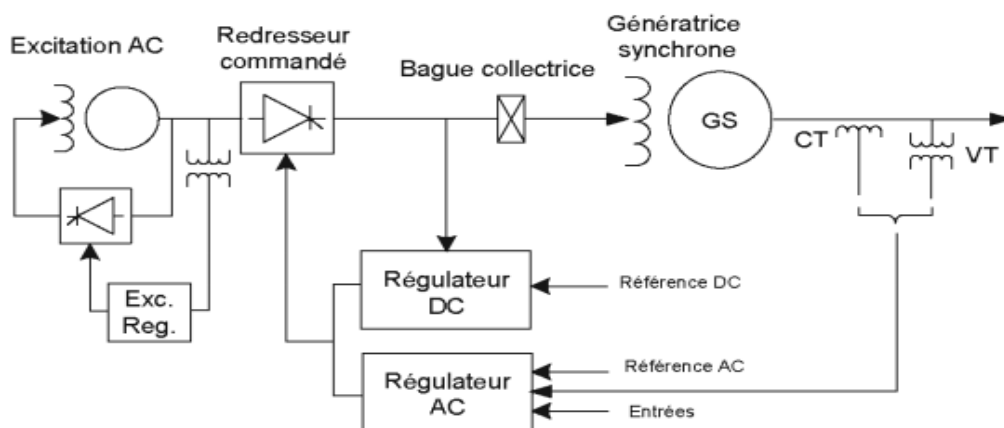


Figure I-18: Excitation de type AC avec redresseur non commandé

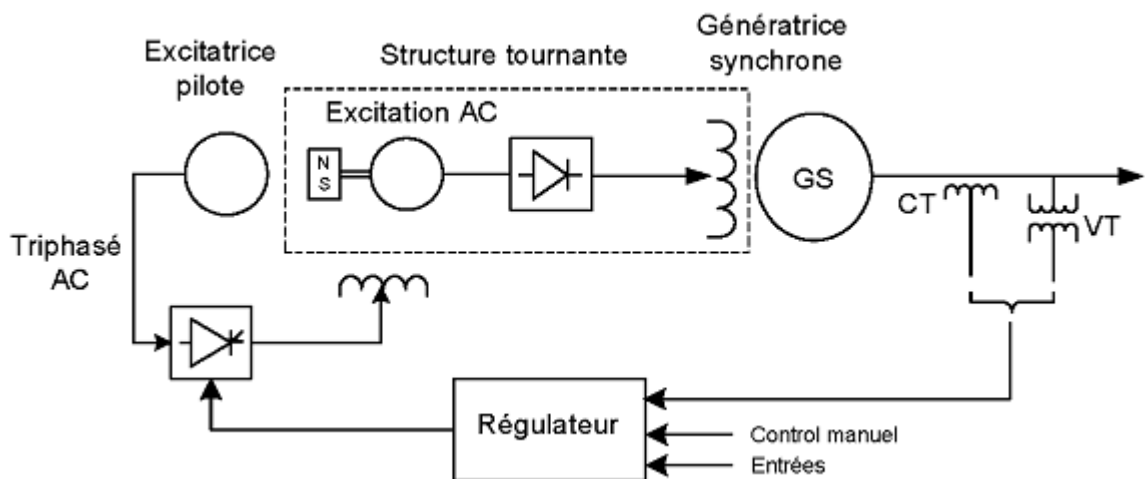


Figure I-19: Excitation type AC avec redresseur commandé.

Dans le cas de l'excitation à courant alternatif avec redresseur tournant, les bagues collectrices sont éliminées et la sortie du redresseur à diodes est directement reliée à la machine synchrone. La Figure 21 illustre l'excitation AC de type *Brushless* où l'on observe la structure tournante composée de l'excitatrice principale AC et du redresseur à diodes, tel que la sortie du redresseur de l'excitatrice pilote active le champ à la structure tournante.

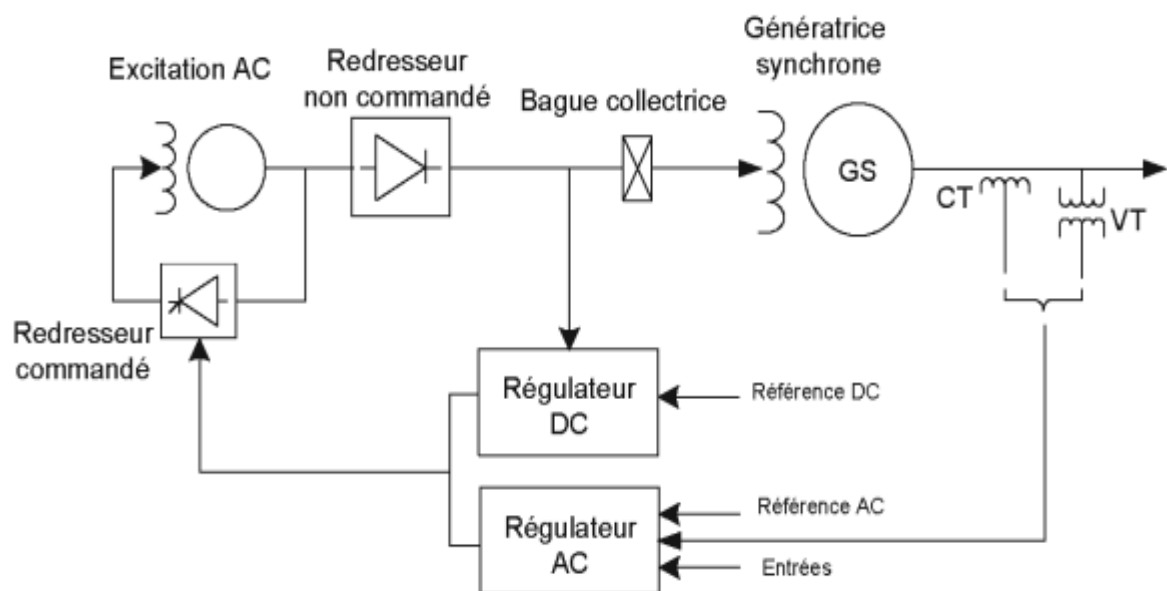


Figure I-20: Système d'excitation de type Brushless.

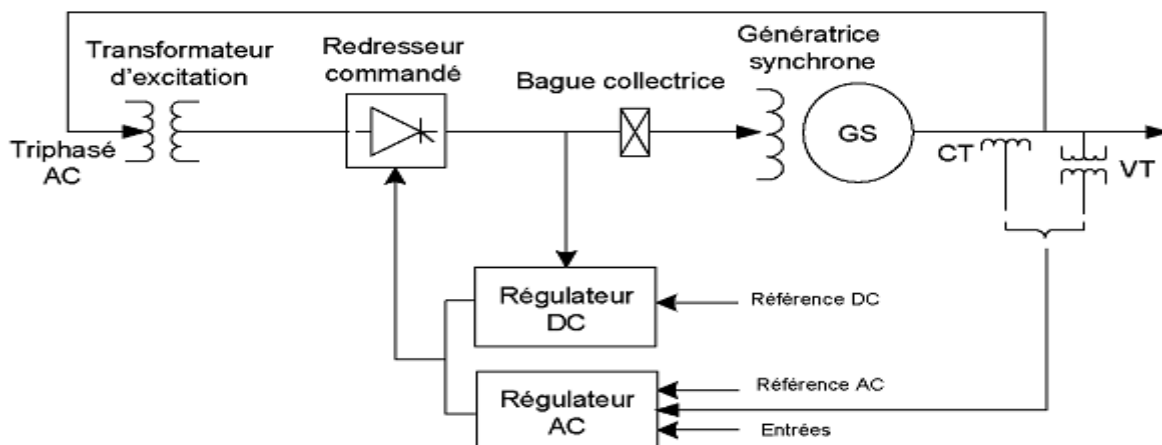
### 6 - 4 - c Systèmes d'excitation statique ;

Dans ce type de système d'excitation, tous les composants sont statiques ou stationnaires. Le redresseur statique fournit le courant d'excitation de la génératrice synchrones à travers des bagues collectrices, et celui-ci est alimenté par la génératrice synchrones à travers un transformateur d'excitation. Cependant il existe trois types d'excitation statique :

- (a) avec redresseur commandé à source de tension
- (b) avec redresseur non commandé à source combinée
- (c) avec redresseur commandé à source combinée

L'excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension (Figure 10) est la plus utilisée des trois, voici énumérés quelques-unes de ses caractéristiques:

- ✓ Pas de partie tournante à part la machine.
- ✓ Utilisation d'un générateur de tension aux bornes, d'un autotransformateur d'excitation et d'un pont de thyristor pour le redressement de la tension AC d'entrée.
- ✓ Possibilité d'utilisation de plusieurs types de correcteurs et régulateurs (PI, PID, Flous, ... etc).
- ✓ Moins coûteuse et facile à entretenir
- ✓ Plus adaptée pour les petites centrales hydroélectriques



**Figure I-21:** Excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension.

## 6 - 5 Commande et circuits de protection des systèmes d'excitation

La commande d'un système d'excitation ne dépend pas simplement du régulateur de tension, mais aussi des fonctions de limitation et de protection qui permettent de bien répondre aux exigences de performance.

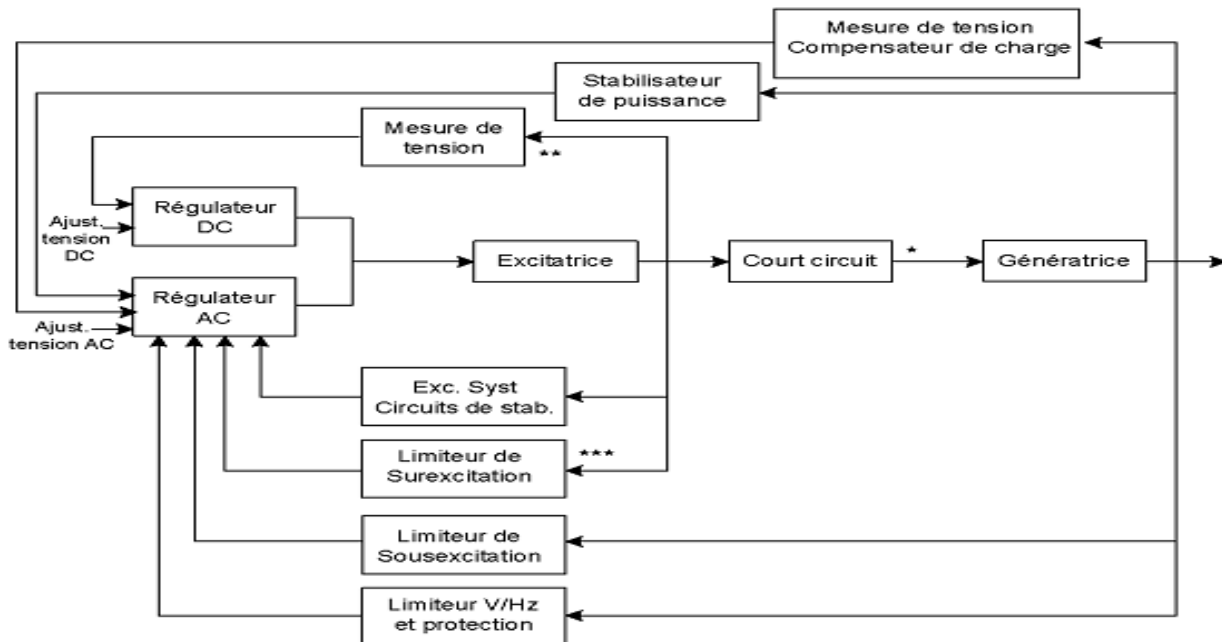


Figure I-22: Système d'excitation munie de circuits de protection

- \* Court-circuit : Applicable pour l'excitatrice type ac et statique seulement
- \* Quelques systèmes ont un régulateur de en boucle ouverte
- \*\*\* Limiteur surexcitation : peut être utilisé avec un régulateur dc

La Figure 23 présente toutes les différentes fonctions et circuits de protection d'un système d'excitation. Cependant l'utilisation de ces fonctions n'est pas requise par les différents types de système d'excitation, mais elles sont distinctes d'un système à l'autre.

### 6 - 5 - a Régulateurs AC et DC

Le régulateur à courant alternatif (AC) contrôle la tension de sortie au niveau du stator de la génératrice synchrone, de plus il permet l'application d'autres contrôle et de fonctions protectrices, comme illustré dans la Figure 23.

Le régulateur à courant continu (DC) contrôle à son tour, la tension d'excitation. Souvent, il est défini par un régulateur automatique de tension (AVR).

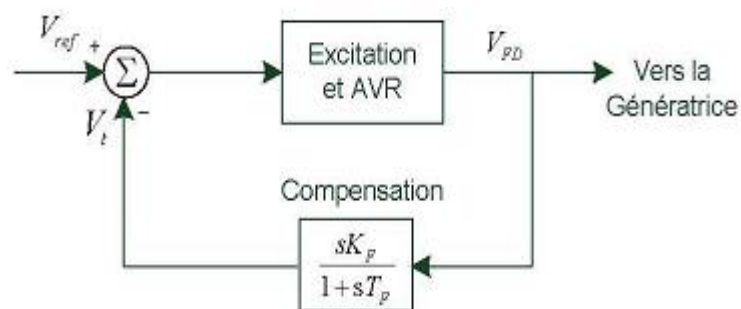
Par ailleurs, plusieurs types de régulateurs peuvent être utilisés dans le cas du courant alternatif, citant les correcteurs conventionnels (PI, PID, ...), qui seront présentés dans le chapitre 4.

**6 - 5 - b Circuits de stabilisation d'un système d'excitation,**

Les systèmes d'excitation comportent des circuits de stabilisation, qui interviennent souvent en cas d'instabilité du système causé par un important temps de réponse (le cas présent dans le système d'excitation de type DC ou AC), ou lorsque le gain du régulateur de tension au stator est très faible. Le circuit de stabilisation est caractérisé par une compensation additionnelle à la boucle de régulation pour améliorer la performance dynamique du système. La Figure 12 illustre la compensation la plus fréquente, qui est définie par une fonction de

transfert sous la forme 
$$\frac{sK_F}{1+sT_F}$$

Les paramètres de la fonction de stabilisation peuvent alors s'ajuster pour assurer le bon fonctionnement du système.



*Figure I-23: Schéma de stabilisation et régulation de l'excitation.*

**6 - 5 - c Stabilisateur de puissance (PSS) ;**

Le stabilisateur de puissance (PSS) utilise des signaux de stabilisation additionnels qui agissent sur le système d'excitation dans le but d'améliorer les performances dynamiques du système électrique global. Généralement les

grandeurs utilisées sont à l'entrée d'un stabilisateur de puissance sont générées par : la vitesse de rotation de l'arbre, la fréquence et la puissance.

L'utilisation d'un stabilisateur de puissance dans les systèmes d'excitation, est souvent requise, car cet élément permet essentiellement l'amortissement des oscillations de puissance surtout dans le cas de faibles signaux, ce qui assure ainsi une meilleure stabilité.

### 6 - 5 - d Compensateur de charge ;

Normalement, c'est le régulateur automatique de tension (AVR) qui assure le contrôle de la tension de sortie de la génératrice. Mais parfois, un compensateur de charge est aussi ajouté pour réguler la tension. Comme montré dans la Figure 13, le compensateur de charge est composé d'une résistance  $R_c$  et une réactance  $X_c$  en série, qui sont ajustables. En utilisant cette impédance, le courant des armatures  $I_l$  mesuré et la tension  $E_l$ , le calcul de la tension de compensation  $V_c$  est donné selon la formule suivante :  $V_c = |E_i + (R_c + jX_c)|$

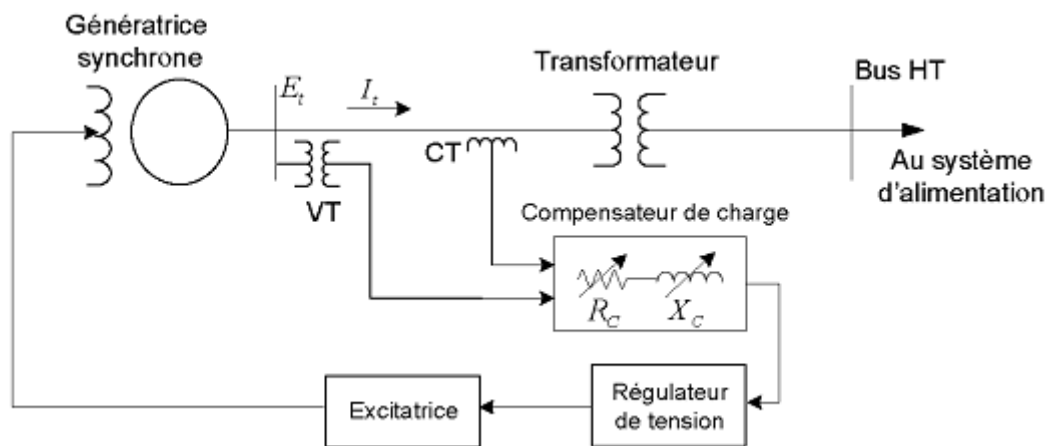


Figure I-24: Schéma du compensateur de charge.

# **Chapitre II :**

## **Modélisation de la génératrice**

## 1 Introduction

La modélisation du générateur permet de donner un aperçu mathématique de son principe de fonctionnement, et l'importance du modèle mathématique est la simulation qui est réalisée par un programme implémenté par l'ordinateur, et donc il faut un modèle mathématique. Notre étude s'appuie sur un générateur synchrone triphasé à pôles saillants en raison de son utilisation fréquente dans le mini central hydroélectrique.

En utilise la transformation de Park et inverse Park aux équations du générateur, le modèle mathématique est exprimé en unités réduites (pu) par des équations électriques de tension et de débit ainsi que des équations mécaniques...etc.

Dans cette section, nous modéliserons la génératrice synchrone triphasée à pôles saillants, le système d'excitation automatique AVR, Le modèle hybride et le modèle hydraulique (governor) régulateur de vitesse.

## 2 Modélisation de la machine synchrone

### 2 - 1 Modèle génératrices :

#### 2 - 1 - a Hypothèses simplificatrices :

Pour la mise en équation du modèle de la machine synchrone permettant l'étude de son comportement en régime dynamique, nous avons retenu les hypothèses simplificatrices suivantes :

- On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé est parfaitement feuilleté ce qui permet de considérer que seuls les enroulements (inducteur, induit, amortisseurs) sont parcourus par des courants.
- Tous les harmoniques d'espaces dans les expressions des forces magnétomotrices sont négligés. Cela revient a considéré les inductances et les mutuelles comme la somme d'une valeur constante et d'un terme

sinusoïdal éventuel dépendant de la position du rotor par rapport au stator.

[1] [22] [23]

## 2 - 1 - b Modèle de la génératrice synchrone dans le repère abc ;

### ➤ Equations magnétiques [7] ;

Les relations entre les flux et courants s'écrivent sous la forme matricielle suivante:

$$\Psi = L(\theta)i \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \Psi_s^{abc} \\ \Psi_r^{abc} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -L_{ss}^{abc}(\theta) & L_{sr}^{abc}(\theta) \\ (-L_{sr}^{abc}(\theta))^t & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{pmatrix} \quad (\text{II-01})$$

Avec :

$$\Psi_s^{abc} = [\Psi_a \quad \Psi_b \quad \Psi_c]; \quad \Psi_r^{abc} = [\Psi_f \quad \Psi_D \quad \Psi_Q]^T; \quad (\text{II-02})$$

$$i_s^{abc} = [i_a \quad i_b \quad i_c]^T; \quad i_r^{abc} = [i_f \quad i_D \quad i_Q]^T$$

$$L_{ss}^{abc}(\theta) = \begin{bmatrix} L_{aa}(\theta) & L_{ab}(\theta) & L_{ac}(\theta) \\ L_{ba}(\theta) & L_{bb}(\theta) & L_{bc}(\theta) \\ L_{ca}(\theta) & L_{cb}(\theta) & L_{cc}(\theta) \end{bmatrix}; \quad L_{sr}^{abc}(\theta) = \begin{bmatrix} L_{af}(\theta) & L_{aD}(\theta) & L_{aQ}(\theta) \\ L_{bf}(\theta) & L_{bD}(\theta) & L_{bQ}(\theta) \\ L_{cf}(\theta) & L_{cD}(\theta) & L_{cQ}(\theta) \end{bmatrix};$$

$$L_{rr}^{abc}(\theta) = \begin{bmatrix} L_{ff}(\theta) & L_{fD}(\theta) & L_{fQ}(\theta) \\ L_{Df}(\theta) & L_{DD}(\theta) & L_{DQ}(\theta) \\ L_{Qf}(\theta) & L_{QD}(\theta) & L_{QQ}(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II-03})$$

### ➤ Equations électriques :

Les équations de tensions sont écrites comme suit :

$$V = RI + \frac{d}{dt}(\Psi) \Leftrightarrow \begin{pmatrix} v_s^{abc} \\ v_r^{abc} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} -R_s & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & R_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Psi_s^{abc} \\ \Psi_r^{abc} \end{pmatrix} \quad (\text{II-04})$$

Telles que :

$$v_s^{abc} = [v_a \quad v_b \quad v_c]^T; \quad v_r^{abc} = [v_f \quad 0 \quad 0]^T$$

$$R_s = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 \\ 0 & r_a & 0 \\ 0 & 0 & r_a \end{bmatrix}; \text{ et } R_r = \begin{bmatrix} r_f & 0 & 0 \\ 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \quad (\text{II-05})$$

$$\begin{pmatrix} v_s^{abc} \\ v_r^{abc} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & R_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \left( \begin{bmatrix} -L_{ss}^{abc}(\theta) & L_{sr}^{abc}(\theta) \\ (-L_{sr}^{abc}(\theta))^t & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{pmatrix} \right) \quad (\text{II-06})$$

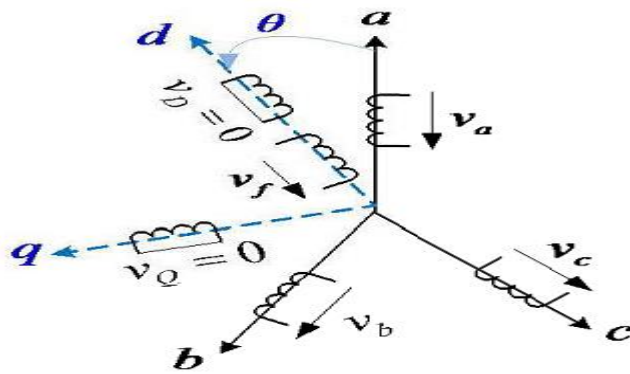


Figure II. 1: Enroulements d'une machine synchrone triphasée (repère abc).

### 2 - 1 - c Modèle de la génératrice synchrone dans le repère de Park (dq0) :

La transformation de Park définit une transformation triphasée-diphasée suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère fixe ( $abc$ ) vers le repère mobile ( $dq0$ ), afin de simplifier le modèle du système vu la complexité de l'étude du système.

Les enroulements au niveau du stator (repère  $abc$ ) sont alors remplacés par deux enroulements ( $dq0$ ) en quadrature.[7]

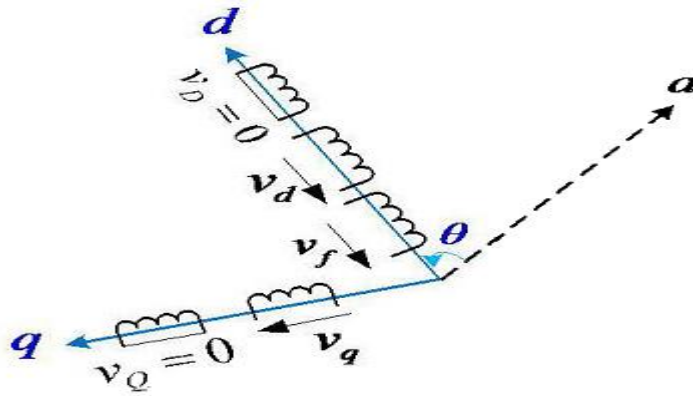


Figure II. 2:Schéma de la machine synchrone en diphasé (référentiel dq0).

La matrice de  $P$  est notée comme suit :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-07})$$

Le coefficient  $\sqrt{\frac{2}{3}}$  est donné pour une conservation de puissance instantanée.

Ces matrices sont les mêmes pour les grandeurs rotoriques et statoriques en spécifiant l'angle par l'indice (s) ou (r).[1].

Ce type de changement de base présente également l'avantage d'obtenir une matrice de transformation inverse qui est transposée de la matrice de transformation directe [26][28] :

La matrice inverse  $P^{-1}$  sera alors :

$$P^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II-08})$$

L'application de la transformation de Park se fait comme suit :

$$[I_{dq0}] = P[I_{abc}] = [i_d \quad i_q \quad i_0]^T$$

$$[\Psi_{dq0}] = P[\Psi_{abc}] = [\Psi_d \quad \Psi_q \quad \Psi_0]^T \quad (\text{II-09})$$

$$[V_{dq0}] = P[V_{abc}] = [v_d \quad v_q \quad v_0]^T$$

✓ **Équations de flux :**

$$\begin{pmatrix} \Psi_s^{dq0} \\ \Psi_r^{dq0} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -L_{ss}^{dq0} & L_{sr}^{dq0} \\ -\frac{3}{2}(L_{sr}^{dq0})^T & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{dq0} \\ i_r^{dq0} \end{pmatrix} \quad (\text{II-10})$$

Telles que :

$$L_{ss}^{dq0} = P(L_{ss}^{dq0}(\theta))P^{-1} = \begin{bmatrix} L_{dd} & 0 & 0 \\ 0 & L_{qq} & 0 \\ 0 & 0 & L_{00} \end{bmatrix}; L_{sr} = PL_{sr}^{abc}(\theta) = \begin{bmatrix} L_{af0} & L_{ad0} & 0 \\ 0 & 0 & L_{aq0} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II-11})$$

✓ **Équations de tension :**

A partir de la formule des tensions dans le repère  $abc$  dans l'équation (06).

Les tensions au niveau du stator peuvent s'écrire :

$$\begin{pmatrix} v_s^{dq0} \\ v_r^{dq0} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & R_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{dq0} \\ i_r^{dq0} \end{pmatrix} + P \begin{bmatrix} \Psi_s^{dq0} \\ \Psi_r^{dq0} \end{bmatrix} + \omega_m W \begin{bmatrix} \Psi_s^{dq0} \\ \Psi_r^{dq0} \end{bmatrix} \quad (\text{II-12})$$

Avec :

$$\omega_m = \frac{d\theta}{dt}; \quad W = \begin{bmatrix} J & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & 0_{3,3} \end{bmatrix}; \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II-13})$$

La conversion des équations en valeur relative (pu) permet de faciliter le calcul et l'évaluation du modèle mathématique plus aisément.

Après avoir introduits les valeurs de références ( $V_s \text{ réf}, I_s \text{ réf}, S_s \text{ réf}, \omega \text{ réf}, \dots$ ) de chaque grandeur, les résultats alors obtenus sont donnés en valeur réduite (pu) dans les équations suivantes [7]:

✓ **Expression des flux en pu :**

$$\begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -X_{ss} & X_{sr} \\ -X_{sr}^T & X_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II-14})$$

Avec :

$$X_{ss} = \begin{bmatrix} x_d & 0 & 0 \\ 0 & x_q & 0 \\ 0 & 0 & x_0 \end{bmatrix}; X_{rr} = \begin{pmatrix} x_{ff} & x_{fD} & 0 \\ x_{Df} & x_{DD} & 0 \\ 0 & 0 & x_{QQ} \end{pmatrix}; X_{sr} = \begin{bmatrix} x_{df} & x_{dD} & 0 \\ 0 & 0 & x_{Qq} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II-15})$$

Telles que les réactances mutuelles sont calculées comme suit :

$$x_d = x_{md} + x_a; \quad x_q = x_{mq} + x_a; \quad x_0 \approx x_a$$

$$x_{ff} = x_{md} + x_{kf1} + x_f; \quad x_{DD} = x_{md} + x_D + x_{kf1}; \quad x_{QQ} = x_{mq} + x_Q$$

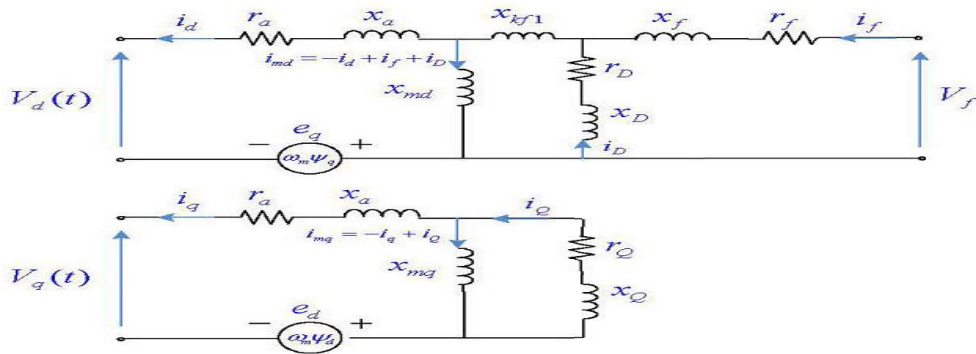
$$x_{df} = x_{fd} = x_{md}; \quad x_{dD} = x_{Dd} = x_{md}; \quad x_{Qq} = x_{qQ} = x_{mq} \quad (\text{II-16})$$

$$x_{fD} = x_{Df} = x_{DD} - x_D = x_{md} + x_{kf1}$$

3.2.2.3.4. Expression des tensions en pu :

$$\begin{bmatrix} V_s \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_s & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_m} P \begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} + \omega_m \begin{bmatrix} J & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & 0_{3,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} \quad (\text{II-17})$$

$$\text{Avec } J = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \omega_n = \omega_{ref} = 2\pi f_{ref} \quad (\text{II-18})$$



**Figure II.3:** Circuits électriques équivalents de la génératrice synchrone triphasée dans le repère de Park (en pu).

La puissance électrique sortante de l'induit est composée de 3 termes :

- La première parenthèse présente la variation par unité du temps de l'énergie magnétique emmagasinée.
- La deuxième parenthèse représente la puissance mécanique transformée en puissance électrique à l'intérieur de la machine.
- La troisième parenthèse représente les pertes joule dans l'induit. [26][27]

Pour obtenir une modélisation complète de la machine, nous adjoignons aux équations électriques, l'équation mécanique de la machine régie par la relation suivante [7]:

$$2H \frac{d\omega_m(t)}{dt} = T_m - T_e - D\omega_m \quad (\text{pu}) \quad (\text{II-19})$$

Avec ;

$$H = \frac{1}{2} j \frac{\omega_m^2}{S_{ref}}$$

H : Constante d'inertie (pu).

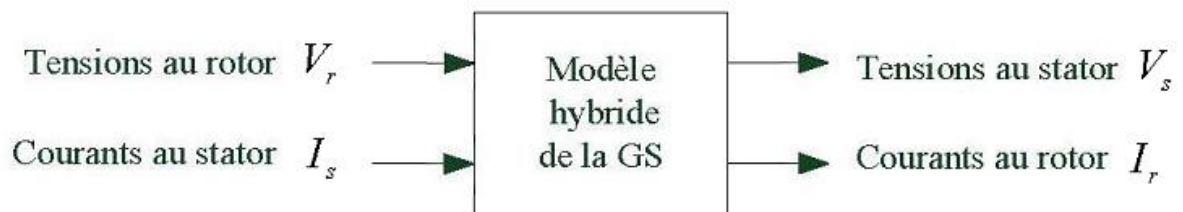
D : Coefficient d'amortissement.

Le couple électromagnétique en pu est calculé par :

$$T_e = (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \quad (\text{pu}) \quad (\text{II-20})$$

## 2 - 2 Développement du modèle hybride de la génératrice synchrone :

Le but principalement visé étant de contrôler, stabiliser et optimiser les valeurs des grandeurs (tension, courant) de sortie au niveau du réseau électrique. Le modèle hybride de la machine synchrone qui est le plus adapté dans ce cas, est alors formulé à partir des équations de tensions et de flux obtenues précédemment. [7]



*Figure II. 4: Illustration des entrées-sorties du modèle hybride de la génératrice.*

Les expressions de tension et flux sont résumés dans :

### ✓ 3.2.3.1. Équation de tension :

$$\begin{bmatrix} V_s \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_s & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_n} P \begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} + \omega_n \begin{bmatrix} J & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & 0_{3,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} \quad (\text{II-21})$$

A partir de l'équation (21), on déduit :

$$(21) \Rightarrow \begin{cases} V_s = -r_s I_s + \frac{1}{\omega_n} P \Psi_s + \omega_n J \Psi_s \\ V_r = r_r I_r + \frac{1}{\omega_n} P \Psi_r \end{cases} \quad (\text{II-22. II-23})$$

✓ **Équation de flux :**

$$\begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -X_{ss} & X_{sr} \\ -X_{sr}^T & X_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II-24})$$

$$(\text{II} - 24) \Rightarrow \begin{cases} \Psi_s = -X_{ss}I_s + X_{sr}I_r \\ \Psi_r = -X_{sr}^T I_s + X_{sr}I_r \end{cases} \quad (\text{II-25. II-26})$$

À partir de l'équation (25) on aura :

$$\frac{1}{\omega_n} P(\Psi_r) = V_r - r_r I_r \quad (\text{II-27})$$

De l'équation (26), on obtient :

$$I_r = -X_{rr}^{-1}(\Psi_r + X_{sr}^T I_s) \quad (\text{II-28})$$

$$\Rightarrow I_r = -X_{rr}^{-1}\Psi_r - X_{rr}^{-1}X_{sr}^T I_s \quad (\text{II-29})$$

En remplaçant (29) dans (27), on aboutit à :

$$\frac{1}{\omega_n} P(\Psi_r) = -r_r X_{rr}^{-1}\Psi_r - r_r X_{rr}^{-1}X_{sr}^T I_s + V_r \quad (\text{II-30})$$

$$\Rightarrow P(\Psi_r) = -\underbrace{\omega_n r_r X_{rr}^{-1}}_A \Psi_r - \underbrace{\omega_n r_r X_{rr}^{-1} X_{sr}^T}_{B_1} I_s + \underbrace{\omega_n}_{B_2} V_r \quad (\text{II-31})$$

En prenant le flux comme variable d'état.

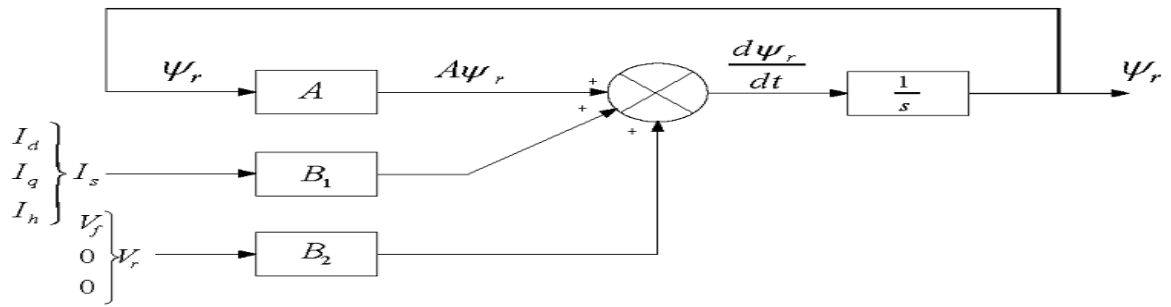


Figure II 5: Schéma fonctionnel des états (flux).

✓ **Calcul des sorties :**

À partir de l'équation (22) ;

$$V_s = -r_s I_s + \frac{1}{\omega_n} P(\Psi_s) + \omega_n J \Psi_s, \text{ en négligeant les deux termes } r_s I_s \text{ et } \frac{1}{\omega_n} P(\Psi_s)$$

On aura  $V_s \approx \omega_n J \Psi_s$

Sachant que 
$$\Psi_s = -X_{ss} I_s + X_{sr} I_r \tag{II-33}$$

En remplaçant (29) dans (32), on obtient :

$$\Psi_s = -X_{ss} I_s + X_{sr} X_{rr}^{-1} \Psi_r + X_{sr} X_{rr}^{-1} X_{sr}^T I_s \tag{II-34}$$

$$\Rightarrow \Psi_s = \underbrace{X_{sr} X_{rr}^{-1}}_C \Psi_r + \underbrace{(X_{sr} X_{rr}^{-1} X_{sr}^T - X_{ss})}_D I_s \tag{II-35}$$

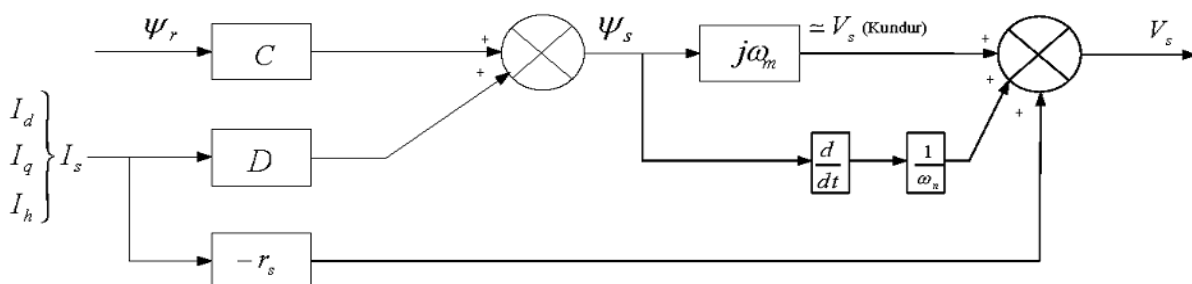


Figure II. 6: Schéma fonctionnel des sorties ( $\Psi_s, V_s$ ).

## 2 - 3 Modèle de la turbine hydraulique et servomoteur :

Dans une turbine hydraulique, les vannes sont actionnées par un servomoteur. L'eau pénètre dans une conduite forcée pour augmenter sa vitesse. À la sortie de la conduite, elle fait tourner une turbine qui entraîne un alternateur. L'eau est ensuite évacuée par une galerie de fuite.

La modélisation de tous les composants de la turbine hydraulique aboutit à un modèle non linéaire décrit par les équations de la dynamique du débit et la puissance mécanique.

$$\begin{cases} \frac{dq}{dt} = \frac{1}{T_w} \left( 1 - \frac{q^2}{A_t^2 g^2} \right) \\ P_m = \frac{q^3}{A_t^2 g^2} \end{cases} \quad (\text{II-36})$$

Le modèle linéaire est obtenu par la linéarisation autour d'un point de fonctionnement  $(g_0, q_0, P_0)$  [7][24], on aura alors les équations suivantes.

$$\begin{cases} \frac{dq}{dt} = \frac{2q_0}{T_w A_t^2 g_0^2} (q - q_0) + \frac{2q_0^2}{T_w A_t^2 g_0^2} (g - g_0) \\ P_m = \frac{3q_0^2}{A_t^2 g_0^2} (q - q_0) + \frac{2q_0^3}{A_t^2 g_0^3} (g - g_0) + P_0 \end{cases} \quad (\text{II-37})$$

En utilisant les équations suivantes au point de fonctionnement :

$$\begin{cases} P_0 = \frac{q_0^3}{A_t^2 g_0^2} \\ q_0 = A_t g_0 = G_0 \end{cases} \quad (\text{II-38})$$

On obtient facilement le modèle linéaire de la turbine hydraulique avec le servomoteur comme suite :

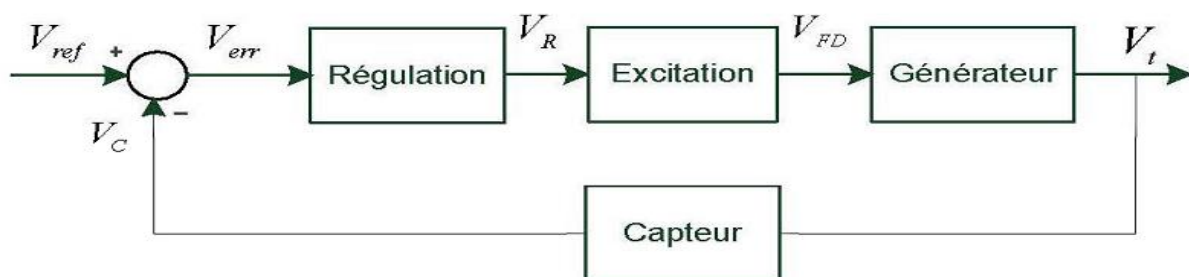
$$\begin{cases} \frac{dq}{dt} = -\frac{2}{T_w G_0} q + \frac{2A_t}{T_w G_0} g \\ \frac{dg}{dt} = -K_a g + K_a u \\ P_m = 3q - 2A_t g \end{cases} \quad (\text{II-39})$$

Où  $g, q, P_m, A_t, T_w, T_a, K_a$  et  $u$  représentent respectivement le débit d'eau dans la turbine, le vannage, la puissance mécanique, gain de la turbine, le temps d'établissement

du débit nominal, la constante de temps du servomoteur, le gain et la commande du servomoteur [7] [25].

### 2 - 3 - a Régulateur automatique de tension ;

La sortie de l'AVR dépend uniquement de la tension terminale. Il agit sur l'excitatrice du générateur afin de maintenir la tension terminale constante [7][8][29]. La Figure 9 représente le schéma de principe de la régulation de tension dans une génératrice.



*Figure II.7: Principe de la régulation de tension dans un groupe turbine-alternateur[7][8][29][30].*

### 2 - 3 - b Régulation et stabilisation de la tension d'excitation,

Le régulateur de tension automatique AVR et l'excitatrice constituent principalement le système d'excitation du générateur [7][8][30]. Comme vu dans le chapitre avant, il existe plusieurs types de systèmes d'excitation. Le régulateur de tension a pour entrée la tension de référence qui constitue la consigne, la tension terminale provenant de la machine synchrone, une tension de stabilisation provenant du stabilisateur de puissance et enfin un retour après amortissement (compensation).

La différence entre la tension terminale et la tension de référence passe par un compensateur de phase puis par le régulateur principal. Ci-dessous est représenté le système d'excitation statique de type ST1 standardisé par IEEE.

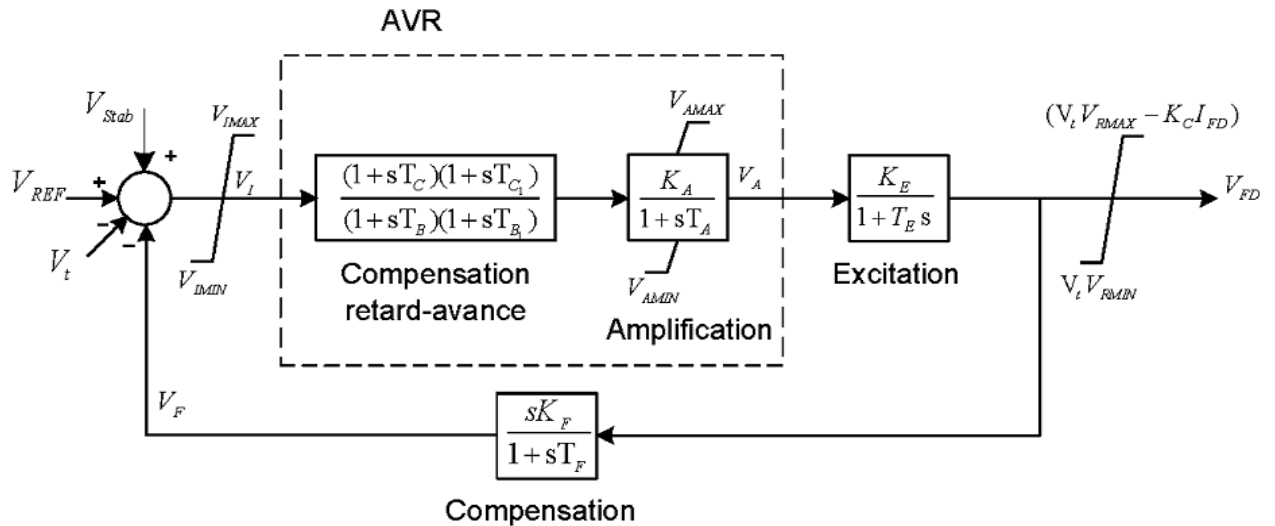


Figure II.8: Système d'excitation type STI de IEEE.

Afin de contrôler la tension d'excitation  $V_{Fn}$ , le système simplifié ( $T_c$ ,  $T_{c1}$ ,  $T_B$ , et  $T_{B1}$  sont négligés) peut être représenté comme suit,

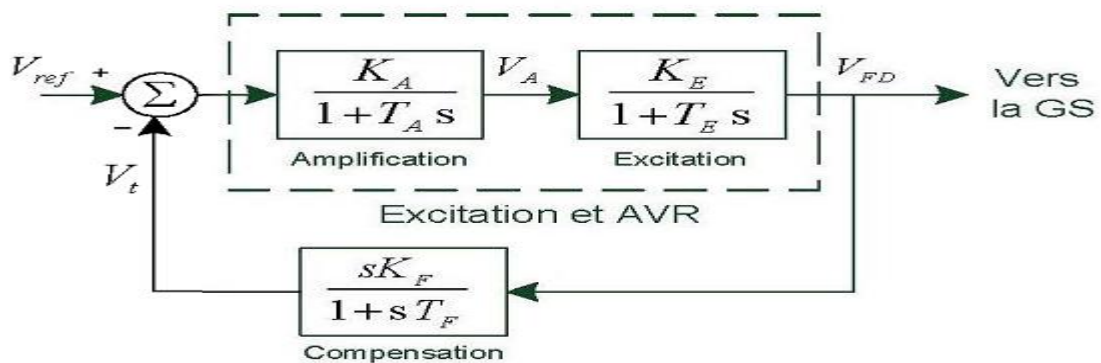


Figure II.9: Régulation et stabilisation de la tension d'excitation.

### 2 - 3 - c Régulation de la tension de sortie de la génératrice synchrone :

Afin de corriger la tension de sortie de la génératrice  $V_s$ , un régulateur de type PID classique est le plus souvent intégré au système vu son efficacité de donner des réponses plus performantes tellement il associe les trois actions principales (proportionnelle, intégrale et dérivée) ; [7][29] [30].

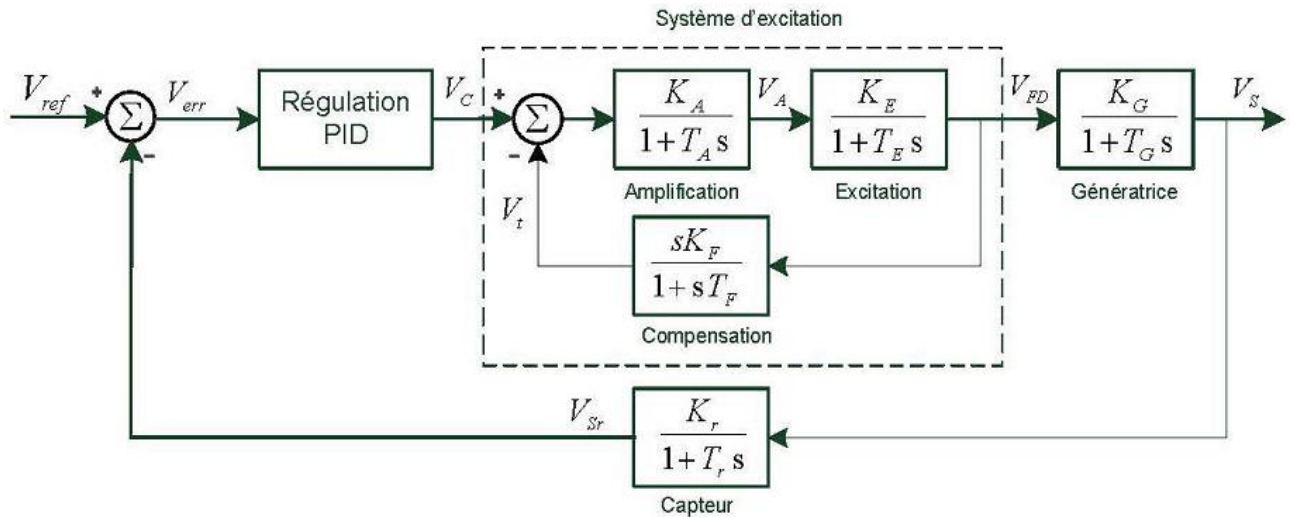


Figure II.10: Régulation de la tension de sortie de la génératrice.

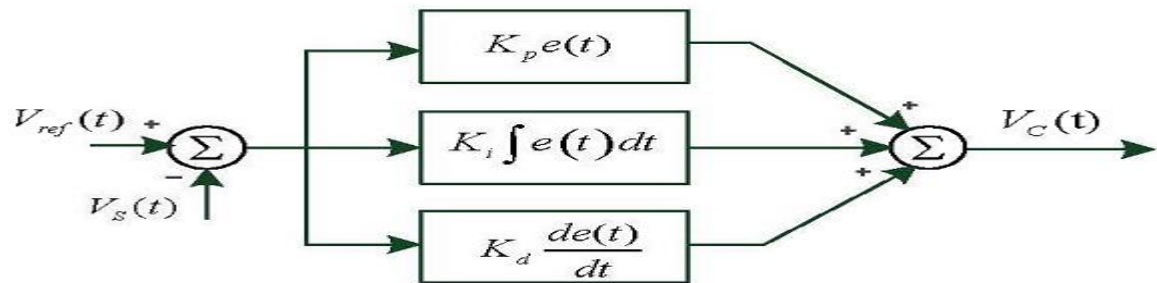


Figure II.11: Schéma fonctionnel d'un correcteur PID classique.

La tension de sortie corrigée est donnée par :

$$V_C(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (\text{II-40})$$

Tel que  $e(t)$  représente l'écart,  $K_p$  le gain proportionnel,  $T_I$  la constante intégrale de temps et  $T_D$  la constante dérivée du temps. La fonction de transfert du correcteur PID s'écrit alors comme suit[7] :

$$G_{PID}(s) = T_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (\text{II-41})$$

➤ Synthèse des paramètres des correcteurs :

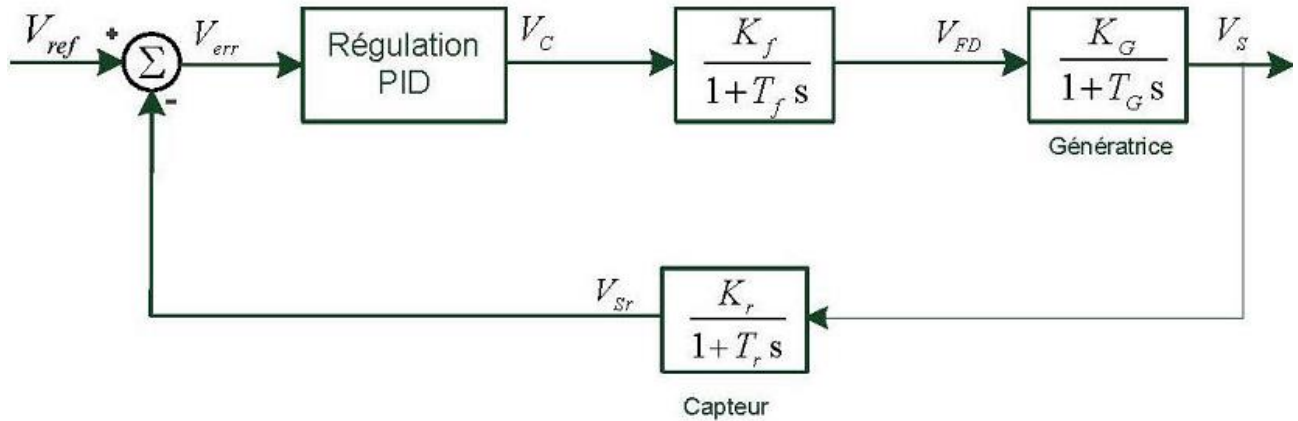


Figure II.12: Schéma de régulation de tension simplifié

Après simplification du système global précédent (Figure 12), le schéma fonctionnel obtenu montré ci-dessus nous permet de calculer aisément les paramètres du correcteur PID, en utilisant la méthode par compensation de pôles. La fonction transfert du correcteur PID peut s'écrire sous la forme [7] :

$$G_{PID}(s) = T_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) = T_P \left( \frac{1 + T_I s + T_I T_D s^2}{T_I s} \right) \quad (\text{II-42})$$

La fonction de transfert (Excitation + Génératrice) est exprimée comme suit :

$$F_T(s) = \frac{K_f K_G}{(1 + T_f s)(1 + T_G s)} = \frac{K'}{1 + (T_f + T_G)s + T_f T_G s^2} \quad (\text{II-43})$$

Après compensation de pôles par les zéros du correcteur PID, on aura :

$$T_I = T_f + T_G, \quad T_D = \frac{T_f T_G}{T_f + T_G} \quad (\text{II-44})$$

En boucle ouverte, la fonction de transfert est exprimée comme :

$$G_{BO}(s) = \frac{K_{BO}}{T_I s} \quad (\text{II-45})$$

Avec  $K_{BO} = K_P K_f K_G$

En boucle fermée :

$$F_{BF}(s) = \frac{G_{BO}(s)H(s)}{1 + G_{BO}(s)H(s)} \quad (\text{II-46})$$

Tel que  $H(s)$  définit la fonction de transfert du capteur qui s'écrit comme suite

:

$$H(s) = \frac{K_r}{1+T_r s} \quad (\text{II-47})$$

En remplaçant les équations (41) et (42) dans (43), on déduit la fonction de transfert du système globale en boucle fermée :

$$F_{BF}(s) = \frac{\left(\frac{K_{BO}}{T_I s}\right)\left(\frac{K_r}{1+T_r s}\right)}{1+\left(\frac{K_{BO}}{T_I s}\right)\left(\frac{K_r}{1+T_r s}\right)} = \frac{1}{1+\left(\frac{T_I s}{K_{BO}}\right)\left(\frac{1+T_r s}{K_r}\right)}$$

$$\Rightarrow F_{BF}(s) = \frac{1}{1+\left(\frac{T_I}{K_{BO}K_r}\right)s+\left(\frac{T_I T_r}{K_{BO}K_r}\right)s^2} \quad (\text{II-48})$$

La forme anonomique d'une fonction de transfert du deuxième ordre est la suivante :

$$\Rightarrow F(s) = \frac{1}{1+\left(\frac{2\varepsilon}{\omega_n}\right)s+\left(\frac{1}{\omega_n^2}\right)s^2} \quad (\text{II-49})$$

Tel que  $\varepsilon$  et  $\omega_n$  représentent respectivement le coefficient d'amortissement et la pulsation propre du système.

Par superposition entre les deux fonctions de transferts  $F_{BF}(s)$  équation (13) et  $F(s)$  équation (14) on aura :

$$\frac{T_I}{K_{BO}K_r} = \frac{2\varepsilon}{\omega_n} \quad (\text{II-50})$$

$$\frac{T_I T_r}{K_{BO}K_r} = \frac{1}{\omega_n^2} \quad (\text{II-51})$$

D'après l'équation (15) et (16) on a résumé comme suite ;

$$\omega_n = \frac{2K_{BO}K_r\varepsilon}{T_I} \quad (\text{II-52})$$

$$K_{BO} = \frac{T_I T_r \omega_n^2}{K_r} \quad (\text{II-53})$$

En remplaçant (17) dans (18), on obtient :

$$K_{BO} = \frac{T_I}{4T_r K_r \varepsilon^2}, \text{ et sachant que } K_{BO} = K_P K_f K_G, T_I = T_f + T_G \text{ et } T_D = \frac{T_f T_G}{T_f + T_G}$$

On déduit alors les gains :

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{BO} = \frac{(T_f + T_G) T_r \omega_n^2}{K_r K_f K_G} \\ \text{ou} \\ K_P = \frac{(T_f + T_G)}{4K_f K_G T_r K_r \varepsilon^2} \end{array} \right. , \quad K_I = \frac{1}{T_f + T_G} , T_D = \frac{T_f T_G}{T_f + T_G} \quad (\text{II-54})$$

➤ Calcul des différents paramètres de chaque fonction de transfert :

- Fonction de transfert simplifiée de la Génératrice synchrone : [7][8]

$$G(s) = \frac{K_G}{1 + sT_G} \quad (\text{II-55})$$

Le calcul de  $K_0$  et  $T_0$  se fait comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} G(s) = K_G \frac{1 + sT_{kd}}{(1 + sT'_{do})(1 + sT'_{do})} \\ K_G = \frac{x_{md}}{r_f} , T'_{do} = \frac{x_{md} + x_f + x_{kf1}}{r_f} \end{array} \right. \quad \Delta\Psi ds = G(s) * efd \quad (\text{II-56})$$

Avec  $x_{kf1} \ll x_f, x_{md} \ll x_f \Rightarrow T_G = T'_{do} = \frac{x_f}{r_f}$

$T_{kd}$  et  $T'_{do}$  sont négligées [7][8].

Fonction de transfert de l'amplificateur :

$$G_f(s) = \frac{K_f}{1 + sT_f} \quad (\text{II-57})$$

La relation entre la tension continue  $V_{sDC}$  obtenue après redressement par le convertisseur commandé, et la tension alternative entre phase  $V_{sah}$  reçue par le réseau à travers le transformateur d'excitation est donnée comme suit :

$$\overline{V_{sDC}} = 1.35 \overline{V_{s_{ab-eff}}} \cos(\alpha)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_f = 1.35. V_2 \cos(\alpha) = 1.35. K_e V_G \cos(\alpha) \\ V_c = V_{tb} \cos(\alpha) = K_{tb} V_G \cos(\alpha) \end{array} \right. \quad (\text{II-58})$$

Où:  $V_f$  est la tension d'excitation (en courant continu),  $V_2$  la valeur efficace de la tension secondaire du transformateur utilisé,  $V_c$  tension corrigée à la sortie du régulateur PID, et  $V_{tb}$  définit la tension génératrice maximale ( $V_{base}$ ). Et  $K_e = V_2/V_G$  et  $K_{tb} = V_{tb}/V_G$  représente respectivement le ratio entre excitation/transformateur et le ratio entre génératrice/transformateur [7][19] ;

Le gain du  $K_f$  de l'amplificateur est alors calculé comme suit :

$$V_f = 1.35. K_e V_G \frac{V_c}{K_{tb} V_G} = K_f V_c \quad (\text{II-59})$$

On déduit alors,

$$K_f = 1.35. K_e / K_{tb} \quad (\text{II-60})$$

Et la constante de temps

$$T_f = \frac{T}{2} = \frac{T_e/6}{2} = \frac{T_e}{12} \quad (\text{II-61})$$

Tels que :

$\alpha$  : Angle d'amorçage des thyristors

$T$  : Période du signal filtré

$T_e$  : Période du signal d'entrée.

### 2 - 3 - d Régulation de la vitesse de rotation

Le schéma ci-dessous (Figure 13) montre le principe de la régulation de la vitesse de rotation et la puissance mécanique d'un groupe turbine hydraulique-alternateur. La boucle de régulation est composée généralement d'un régulateur (*governor*), d'un servomoteur et d'une turbine.

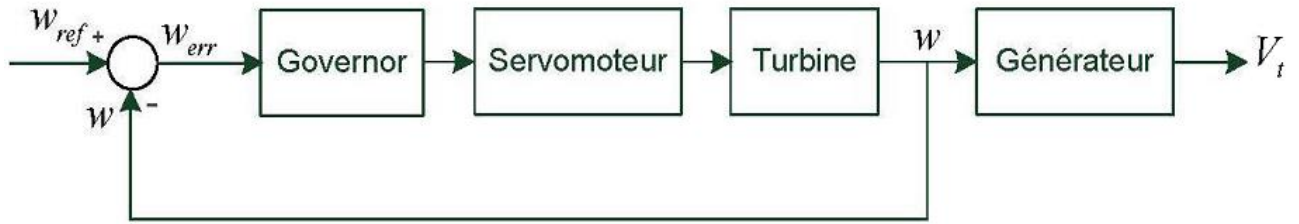


Figure II.13: Principe de la régulation de la vitesse

Le régulateur (*governor*) est souvent représenté par un régulateur classique PID (Proportionnel, intégral et dérivée) dans la Figure 14 [7][25]. Le PID agit sur la position du vannage de la turbine en fonction de la variation de la vitesse par rapport à sa valeur nominale. Le statisme a pour rôle le partage de la charge totale du réseau entre différents générateurs s'il y a lieu. Il permet aussi d'assurer le bon fonctionnement de plusieurs turbines dans un réseau électrique. Un exemple de calcul des paramètres  $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$  du régulateur PID classique de vitesse est donné en [7].

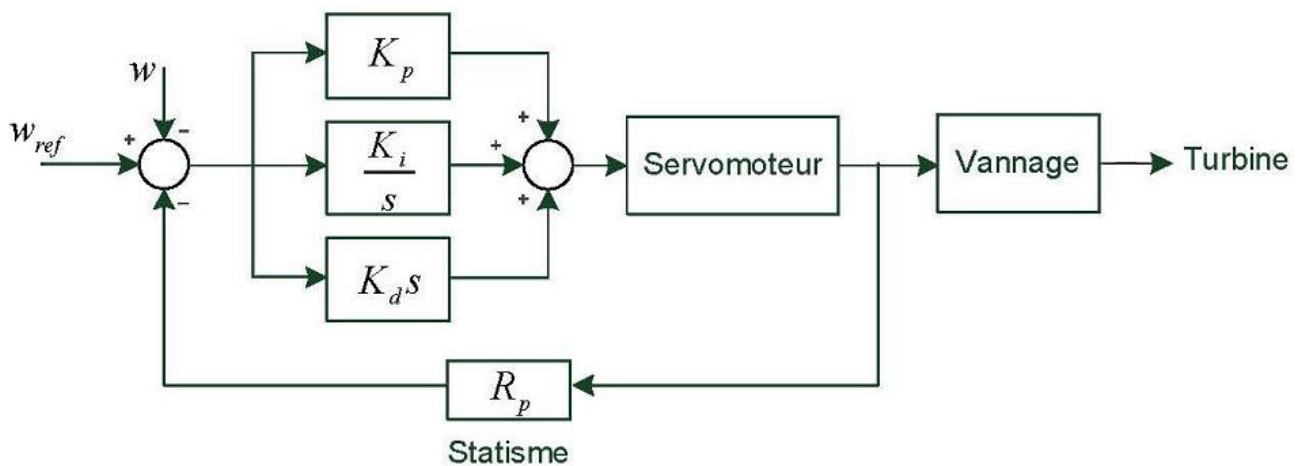


Figure II.14: Régulateur de vitesse type PID

Le modèle du servomoteur est décrit par une fonction de transfert simple du premier ordre  $\frac{K_a}{T_a s + 1}$  semblable à celle d'un moteur. Il génère la vitesse de rotation de la turbine en commandant l'ouverture du vannage. Il est représenté dans le schéma suivant [7][25] :



Il existe plusieurs types de stabilisateurs utilisés dans la commande des réseaux électriques. Le plus important est le modèle conventionnel à une entrée type IEEE PSS 1A [7][31][32] présenté en Figure 17, il est constitué d'un gain  $K_{stab}$  qui détermine le niveau d'amortissement du PSS, d'un filtre passe-haut qui va permettre au PSS d'agir seulement en cas de variation rapide de vitesse et éliminer l'action de ce dernier lorsque la vitesse de la machine est constante et enfin un compensateur de phase.

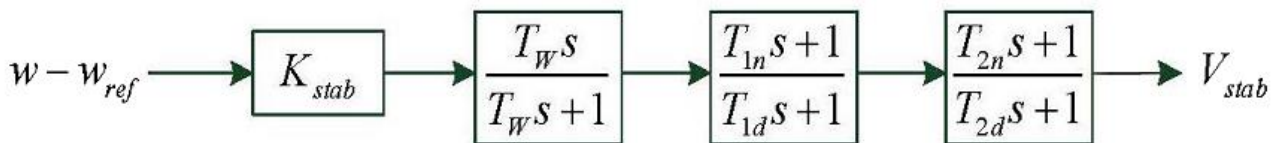


Figure II.17: Stabilisateur de puissance de type IEEE PSS 1A

Le schéma suivant (Figure 18) montre la régulation globale dans les différents blocs du système (groupe Turbine hydraulique - Alternateur synchrone avec leurs système d'excitation STI) [7].

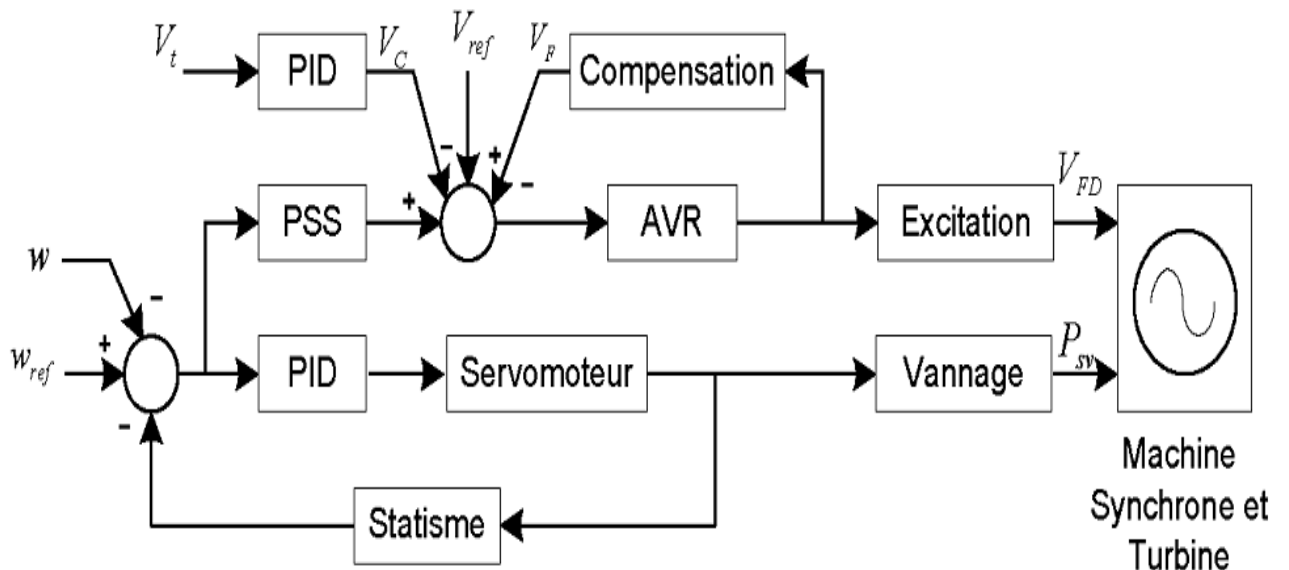


Figure II.18: Schéma de la régulation globale

### 3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons les modèles mathématiques du générateur synchrone à pôles saillants et du groupe turbogénérateur avec le système de régulation de l'effort et de la vitesse en développant des équations mathématiques afin de donner la relation entre ses différentes caractéristiques et de faciliter l'étude des systèmes. puis nous avons simplifié le modèle passant par des hypothèses simplificatrices ainsi que la transformation du Park en obtenant un système simple, facile à élaborer sur l'interface Simulink de MATLAB qui nous a permis d'étudier les caractéristiques dynamiques de l'alternateur tels que : les vecteurs du courants et tension rotorique statoriques ,couple électromagnétique, vitesse et puissances en régime établie et avec defaults.

Dans le chapitre suivant nous intéressons aux différents types de stabilités et de résolution des problèmes d'instabilité qui se pose dans le système et pour se faire nous utiliserons des régulateurs de tension et de vitesse en vue de maintenir la tension constante aux bornes de l'alternateur pendant leur fonctionnement de l'ensemble.

**Chapitre III :**  
**Régulation et simulation de**  
**l'ensemble génératrice-**  
**turbine**

## **1 Introduction :**

Ce chapitre présente les résultats de l'application qui confirment notre travail et les différents tests à travers l'application Simulink Matlab. Divers résultats de la régulation sont donnés (régulation de tension par AVR, régulation de vitesse GOV, stabilisation de puissance par PSS ...), en plus de simuler plusieurs tests sur le modèle de système global qui ont été assemblés et mis en œuvre selon les formes des blocs Simulink et le texte script m. fille (voir Annexe 4 jusqu'à 15) ;

Nous avons effectué plusieurs tests, y compris le test du système de régulation de la tension et de la vitesse et la façon dont ils interagissent, le test de réponse au saut d'énergie, etc. C'est en présentant des courbes qui montrent comment les organisations font leur travail, avec quelle rapidité, elles répondent et l'exactitude des données

Dans notre étude s'est basée sur une unité de réduite (pu) pour faciliter et simplifier les simulations et pour faire les opérations de conversion. Nous avons mis en annexe un tableau dans lequel toutes les unités (Voir Annexe 03).

## **2 Schéma simplifié du turbine-alternateur et du système de commande :**

Dans la plupart des modèles commande et régulation des turbine-alternateur surtout dans les petite centrale hydroélectrique, leur schéma est régi par des constantes référentielles (pression, débit, vitesse et tension...etc), la figure 1, schéma d'un modèle simplifié d'une turbine-alternateur, que nous proposons pour la modélisation et la simulation.

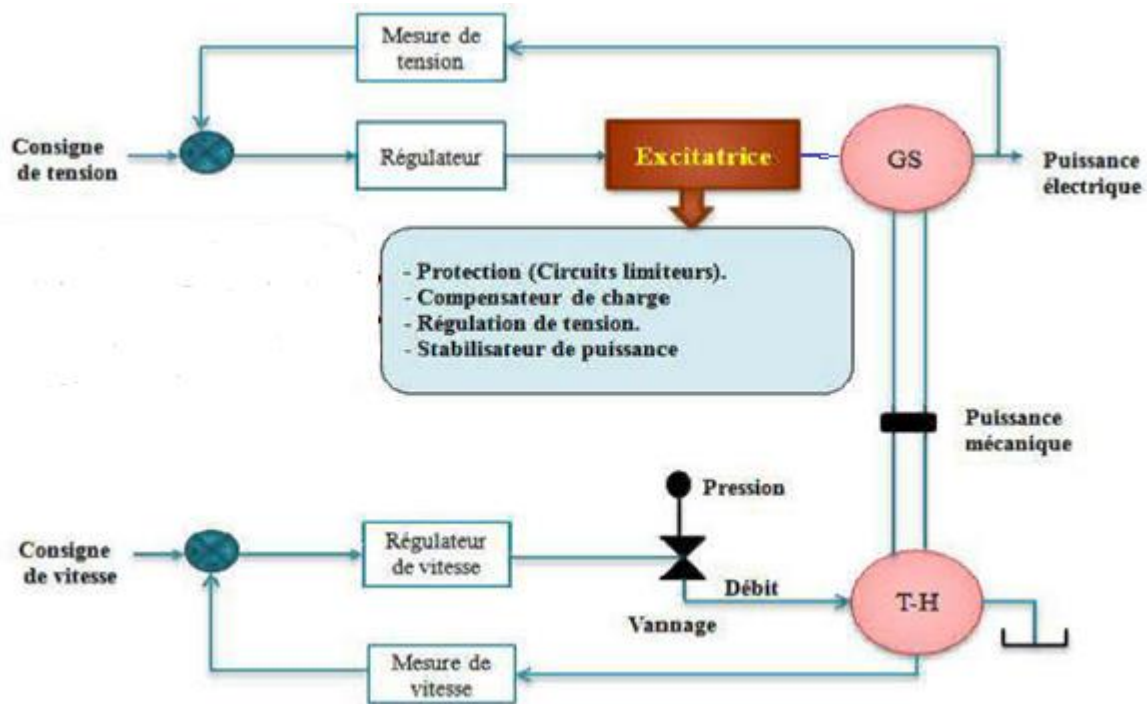


Figure III.1: Schéma globale de système.

### 3 Paramètre des différents blocs

Les paramètres de chaque élément du groupe turbine-alternateur sont donnés en tableaux ;

Paramètres de la génératrice

| Parametres                 | Symboles | Valeurs  |
|----------------------------|----------|----------|
| Puissance apparante        | S        | 200 KW   |
| Tension nominale au stator | V        | 400 V    |
| Courant maximale au stator | I        | 360 A    |
| Fréquence                  | F        | 50 Hz    |
| Vitesse de rotation        | N        | 1000 Rpm |
| Nombre des paires de pôle  | P        | 3        |

| <b>Résistances en (pu)</b>  |           |         |
|-----------------------------|-----------|---------|
| Résistance au stator        | $R_s$     | 0.026   |
| Résistance de fuite         | $R_r$     | -       |
| <b>Réactances en (pu)</b>   |           |         |
| Synchrones axe d et q       | $X_d$     | 0.669   |
|                             | $X_q$     | 0.3417  |
| Transitoires axe d et q     | $x'd$     | 0.18    |
|                             | $x'q$     | 0.36    |
| Sub-transitoires axe d et q | $x''d$    | 0.13    |
|                             | $x''q$    | 0.09    |
| Fuite au stator             | $X_f$     | 0.09    |
| Kenty                       | $x_{kf1}$ | -0.0081 |

*Tableau III.1: Paramètres de la génératrice synchrone.*

Paramètres initiaux de l'excitatrice statique type ST1A

|                         |                  |                  |                 |                 |
|-------------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| Limitation des tensions | $V_{Amax} = 400$ | $V_{Amin} = 400$ | $V_{Rmax} = 40$ | $V_{Rmin} = 40$ |
| Limitation des courants | $V_{Imax} = 116$ | $V_{Imin} = 116$ | -               | -               |
| Rectification           | $K_c = 0.04$     | $K_{LR} = 1$     | -               | -               |
|                         | $K_A = 1.62$     | $K_f = 0.0503$   | $K_E = 1$       | $K_b = 1$       |

|   |                            |                |                         |           |
|---|----------------------------|----------------|-------------------------|-----------|
| Régulateur automatique de tension (AVR)               | $T_A = 0.0087$             | $T_f = 0.3774$ | $T_E = 0$               | $T_c = 1$ |
| Régulateur classique PID                              | $K_p = 1.13 \cdot 10^{-4}$ | $K_I = 6.3496$ | $K_d = 0.0082$          |           |
| Paramètres de transformateur de stabilisation en (pu) | $R_t = 0.0159$             | $L_t = 0.006$  | $M = 0.8 \cdot 10^{-3}$ |           |

**Tableau III.2:** Paramètres du système d'excitation statique ST1.

Paramètres de la turbine hydraulique (Idéale)

|                      |              |   |
|----------------------|--------------|---|
| Puissance nominale   | $P_m$        | 215 KW  |
| Vannage              | -gmax<br>-g0 | -Ouverture nominale : 5 pu<br>-Ouverture à vide : 0.02 pu |
| Débit d'eau nominale | $Q$          | 0.5 m <sup>3</sup> /s                                     |

**Tableau III.3:** Paramètres de la turbine hydraulique [7].

## 4 Régulation de la tension d'excitation :

L'excitatrice IEEE STI A est un ensemble du régulateur automatique de tension AVR, contrôleur PID et limiteur de tension...etc. on a de contrôler la tension d'excitation  $V_{fd}$ , tension terminale  $V_t$  et la tension aux borne de la charge  $V_f$  comme illustré par les schémas suivants :

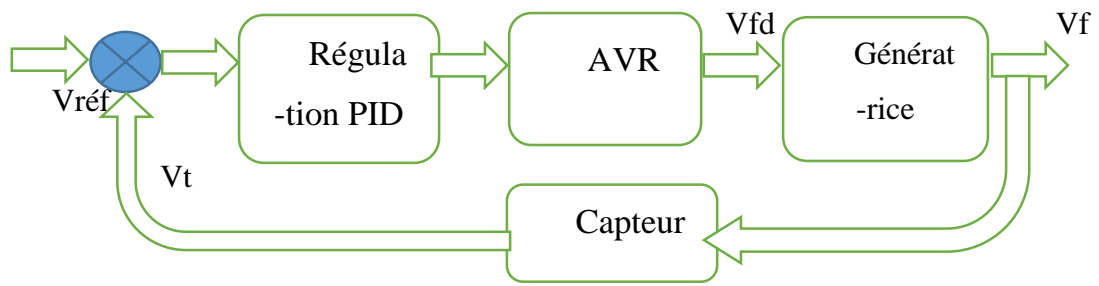


Figure III.2 : Régulation de la tension sortie de génératrice.

Affichage des résultats de la simulation :

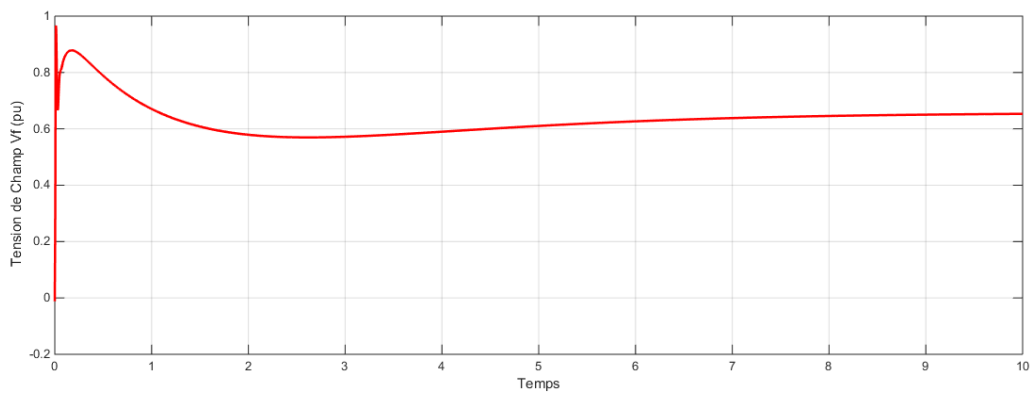


Figure III.3: Tension à la borne de la charge Vf.

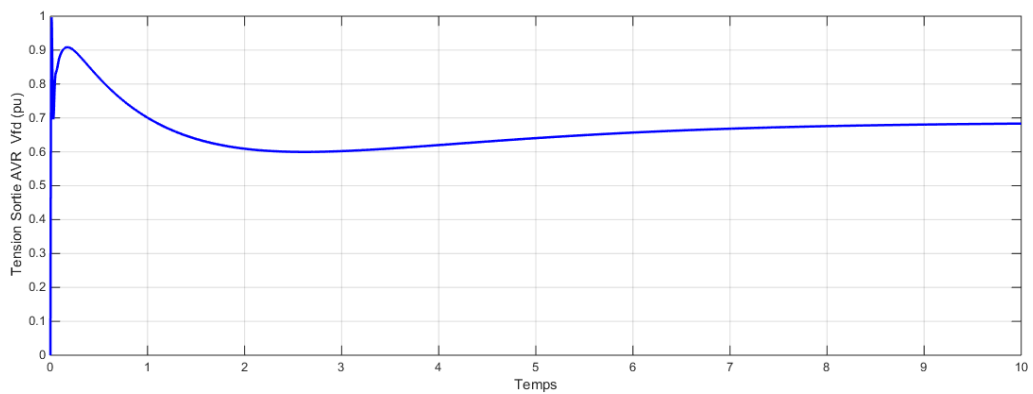
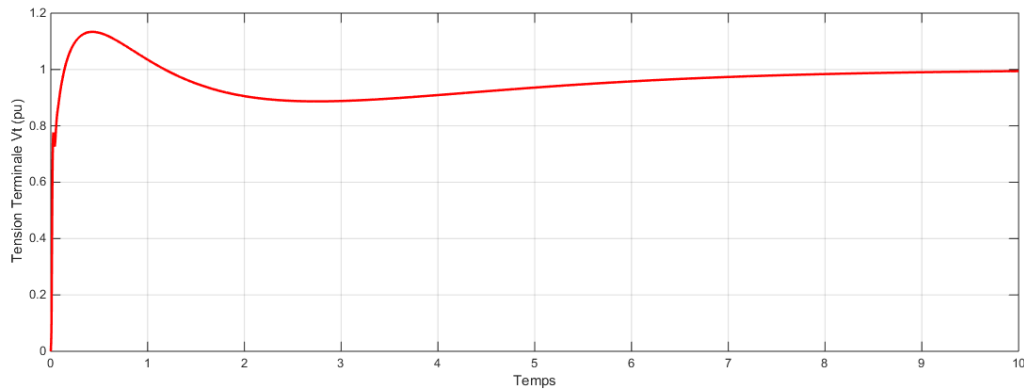


Figure III.4: Tension sortie AVR Vfd.



*Figure III.3: Tension terminale  $V_t$  (Vs).*

### Remarque :

- Réponse concordante entre la tension génératrice  $V_f$  et la tension d'excitation  $V_{fd}$  presque équivalant au train de la stabilisation (Figure 3 et 4).
- Réponse concordante la courbe figure 4.5 tension génératrice  $V_t$  (Vs) c'est la lecture de tension de sortie de génératrice.
- La régulation par PID classique utilisée révèle quelques dépassements, une bonne précision et une rapidité de réponse satisfaisante (Figure3 et 4).

## 5 Régulation des tensions dans le système global ;

Le modèle hybride de la machine synchrone est un organe très important qui joue un rôle d'assembleur et relie la génératrice avec au système d'excitation statique de type STI. Une représentation schématique est illustrée ci-dessous pour montrer les différents blocs. Et les résultats de simulations sont donnés après implémentation sous Matlab Simulink.

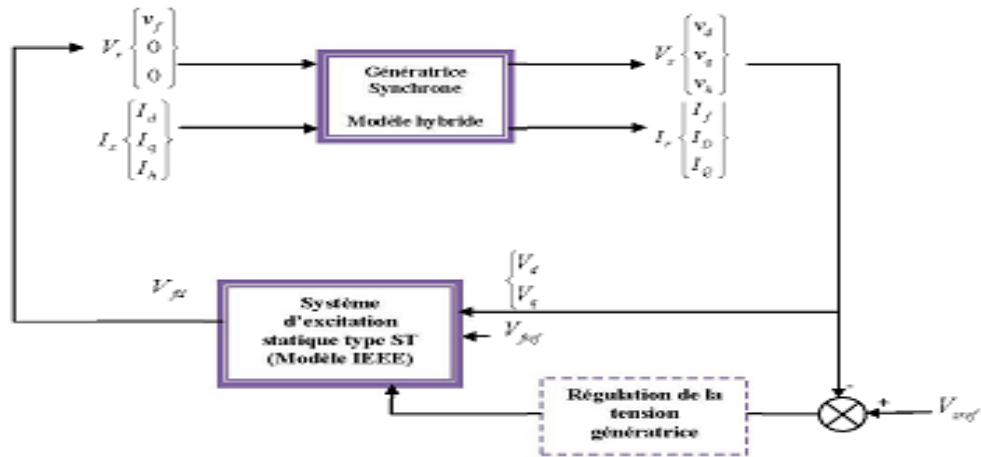


Figure III.4: Représentation schématique du système global (Génératrice + Excitation).

Affichage des résultats de la simulation :

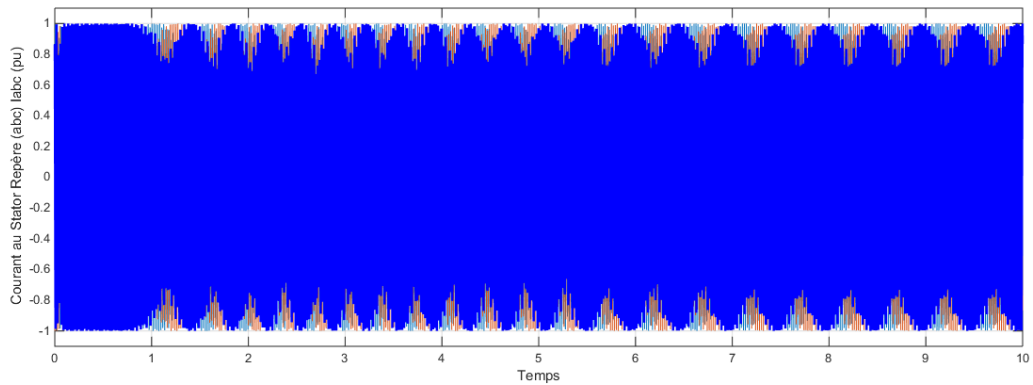


Figure III.5: Courant d'entre labc.

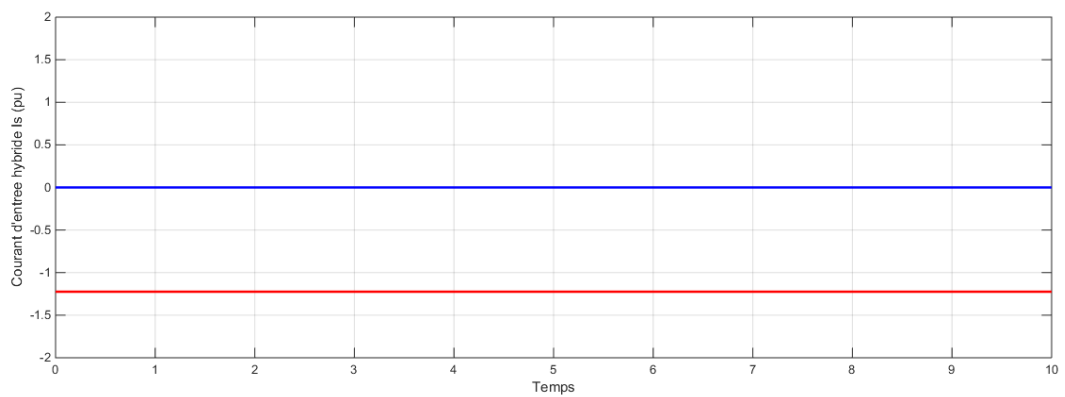
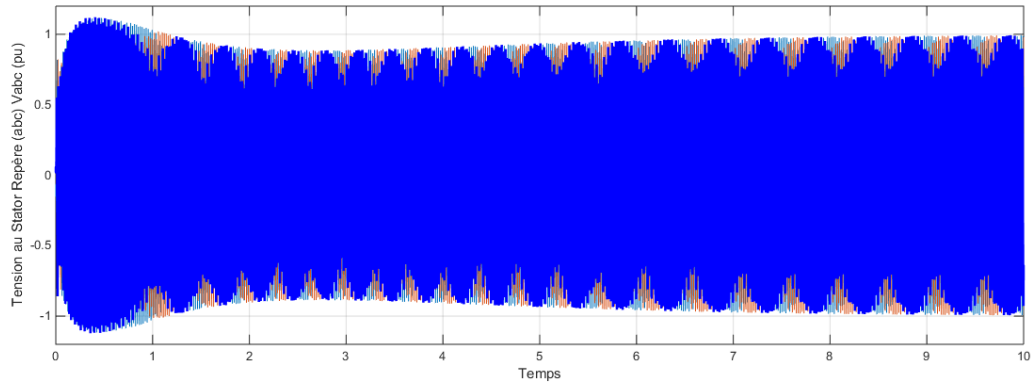
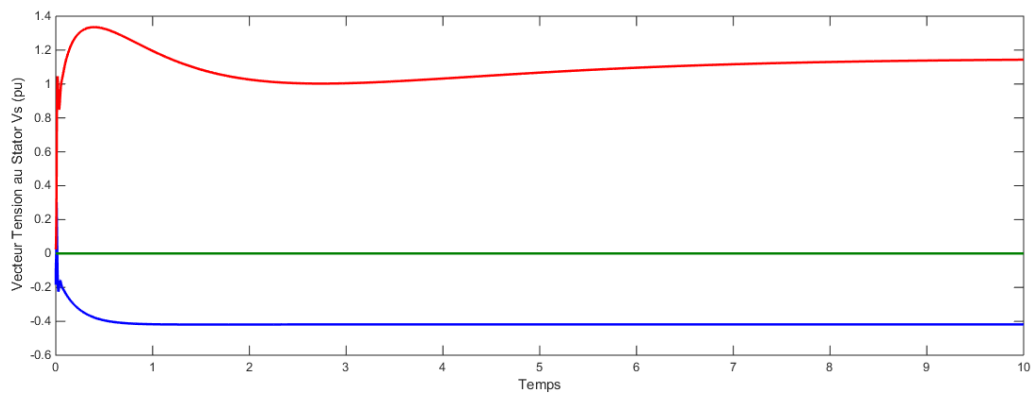


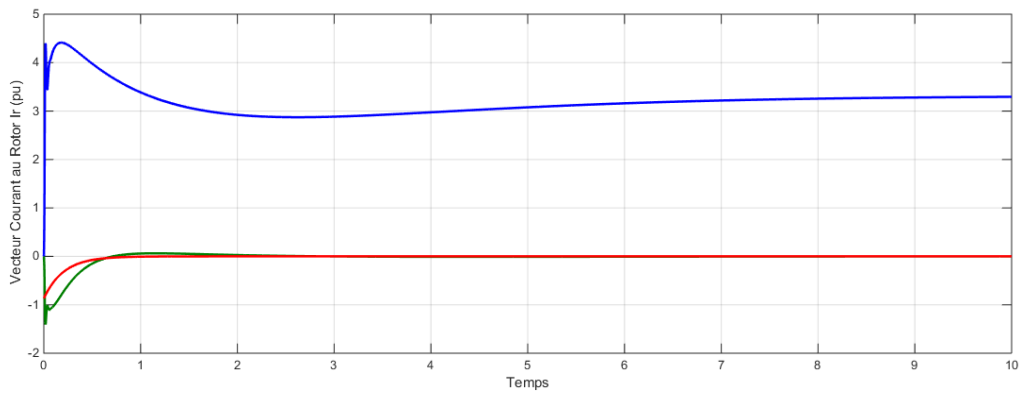
Figure III.6: Courant d'entre Is.



*Figure III.9: Tension de sortie de la génératrice  $V_{abc}$ .*



*Figure III.8: Vecteur tension au stator  $V_s$ .*



*Figure III.7: Vecteur courant au rotor  $I_r$ .*

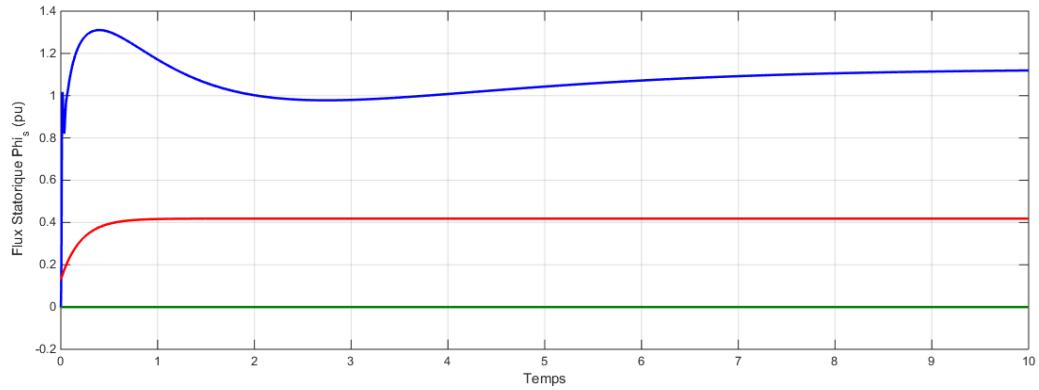


Figure III.10: Flux statorique modèle hybride  $\Phi_{i_s}$ .

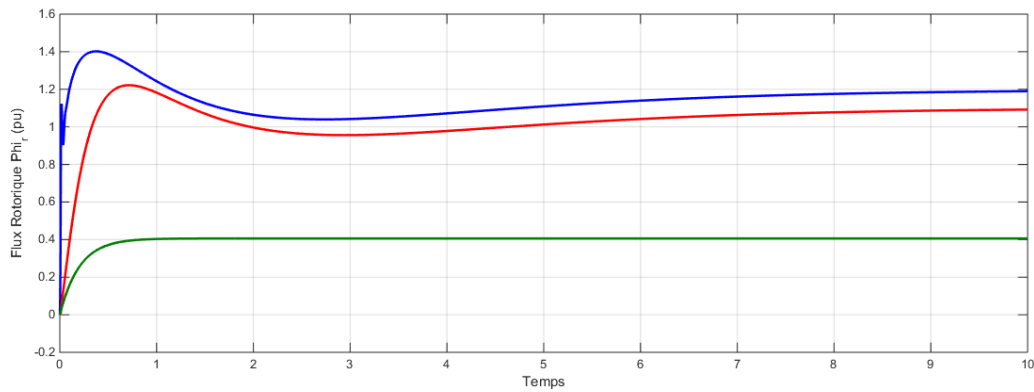


Figure III.11: flux rotorique modèle hybride  $\Phi_{i_r}$ .

## 6 Stabilisation de puissance PSS :

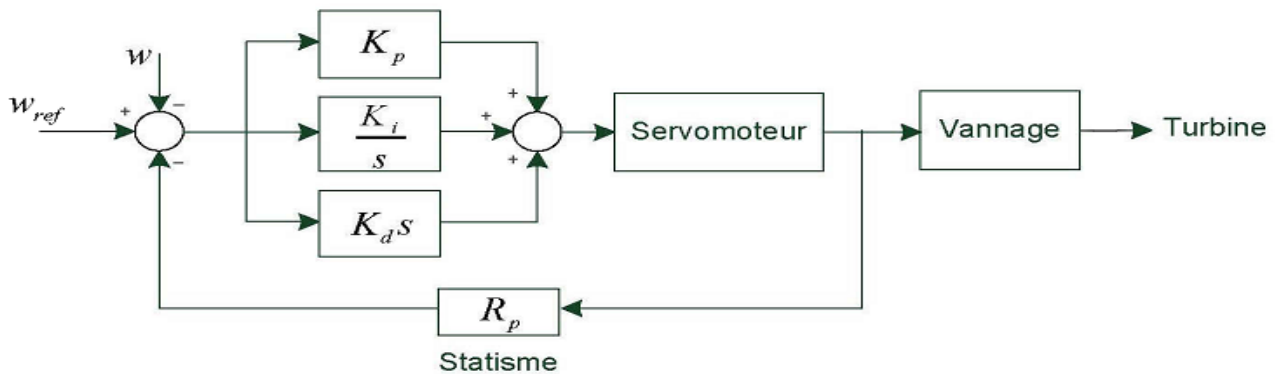
Dans le but de remédier à l'amortissement des oscillations de puissances, et d'avantage la stabilisation de la tension d'excitation, un PSS IA de type IEEE est ajouté au niveau de la boucle de régulation des tensions.

La régulation globale dans les différents blocs du système (groupe Turbine hydraulique génératrice synchrone avec leurs systèmes de la régulation tension, vitesse et stabilisateur de puissance), sont alors présenté par le schéma suivant :



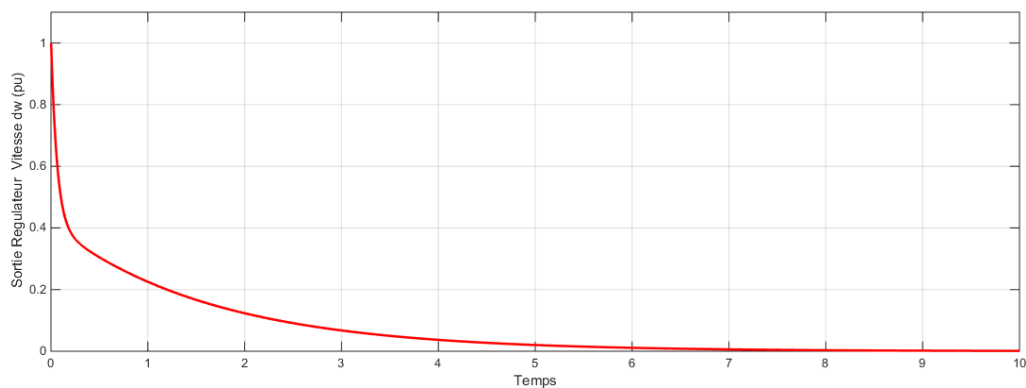
## 7 Régulation de la vitesse de rotation et de la puissance mécanique :

Afin de réguler la vitesse de rotation et la puissance mécanique, un PID classique est choisi, selon le schéma fonctionnel suivant :

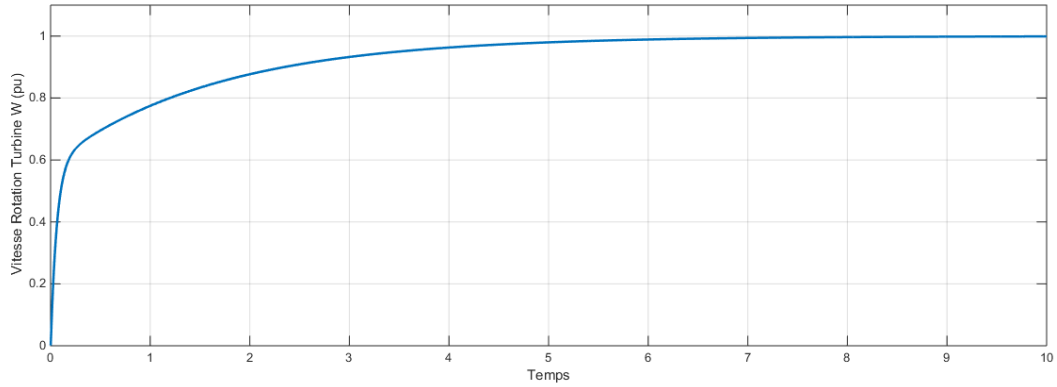


*Figure III.14: Régulateur de vitesse type PID.*

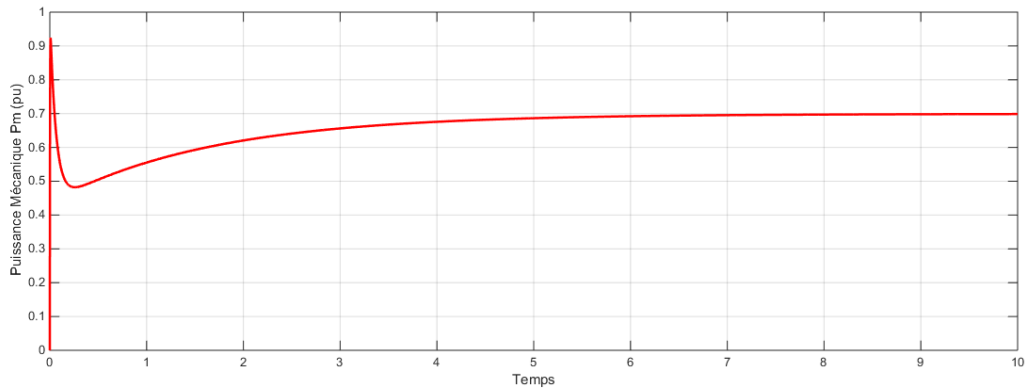
En utilisant les paramètres d'une turbine hydraulique idéale les plus usuelles (Tableau 3), les résultats de simulation sont donnés sur les figures ci-dessous [7]:



*Figure III.15: Sortie régulateur variation de vitesse (dw).*



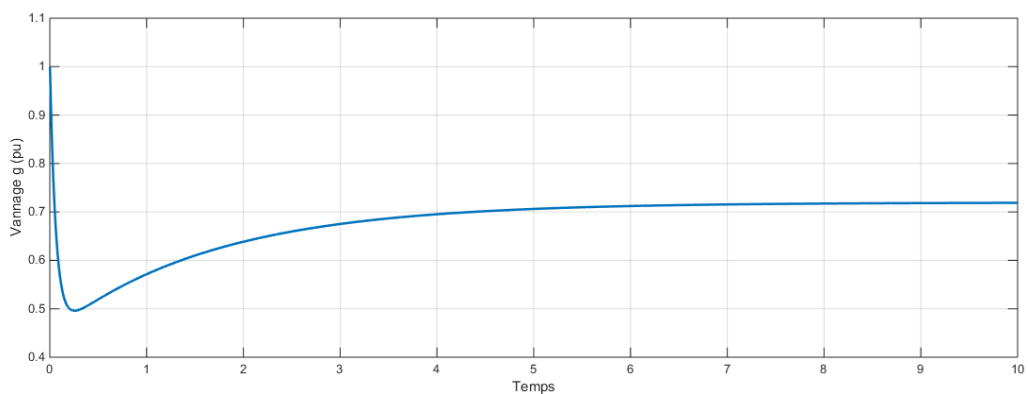
**Figure III.16:** Vitesse rotation de la turbine  $W$ .



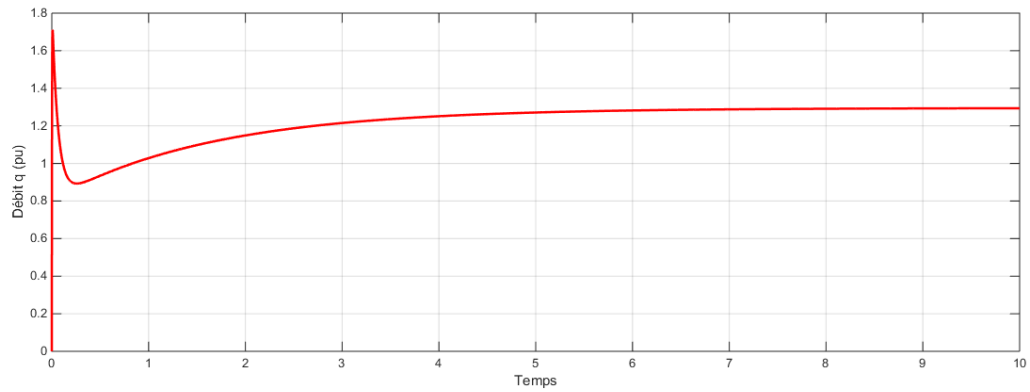
**Figure III.17:** Puissance mécanique de la turbine  $P_m$ .

Selon la Figure 18 et 19, la vitesse de rotation ainsi que la puissance mécanique suivent parfaitement la consigne grâce au régulateur PID, sans dépassements (survitesse).

L'ouverture du vannage  $g$  et le débit d'eau  $q$  correspondants sont comme suit:

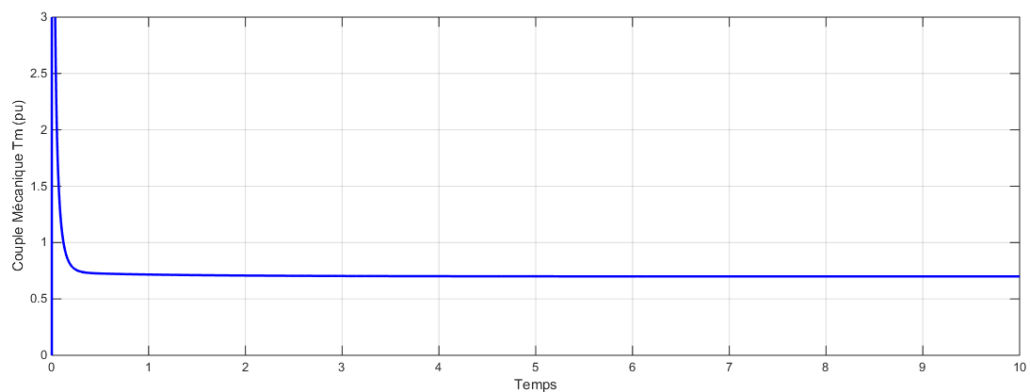


**Figure III.18:** Vannage de la vanne  $g$ .



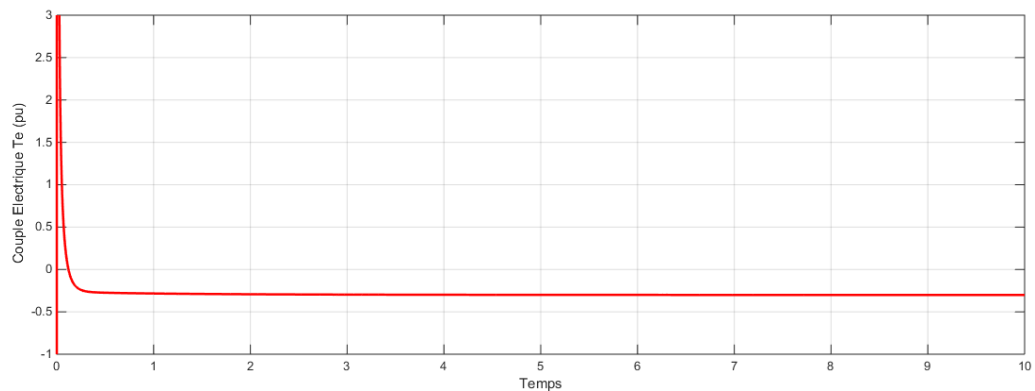
**Figure III.19:** Débit d'eau  $q$ .

L'ouverture de vannage  $g$  et le débit d'eau  $q$  montre une bonne symétrie avec la puissance et la vitesse de rotation (Figure 20 et 21). Et l'erreur de vitesse s'annule assez vite (0.2s) Figure21, ce qui justifie une meilleure réponse et rapide.

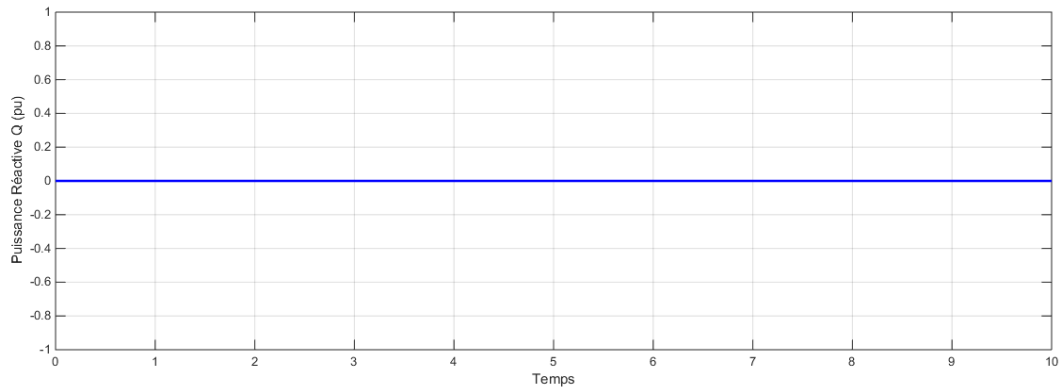


**Figure III.20:** Couple mécanique de la turbine  $T_m$ .

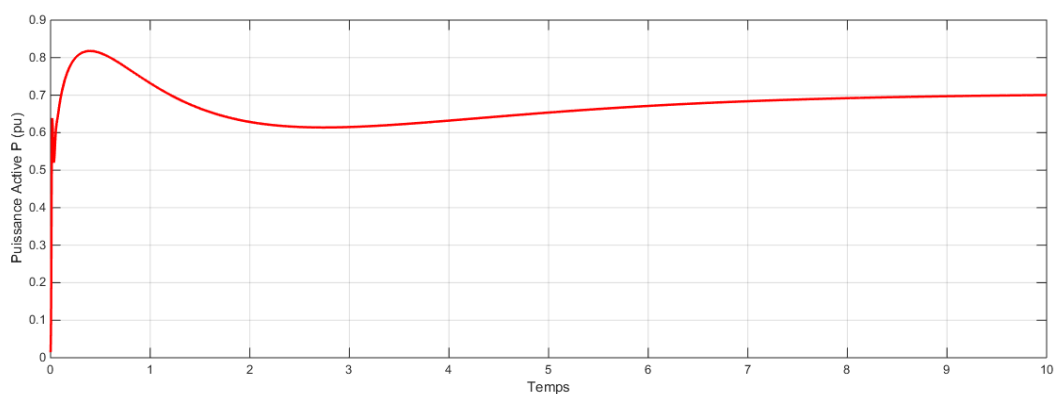
Calcule des puissances et les couples :



**Figure III.21:** Couple électrique  $T_e$ .



**Figure III.22:** Puissance réactive  $Q$ .



**Figure III.23:** Puissance active  $P$ .

### Remarque :

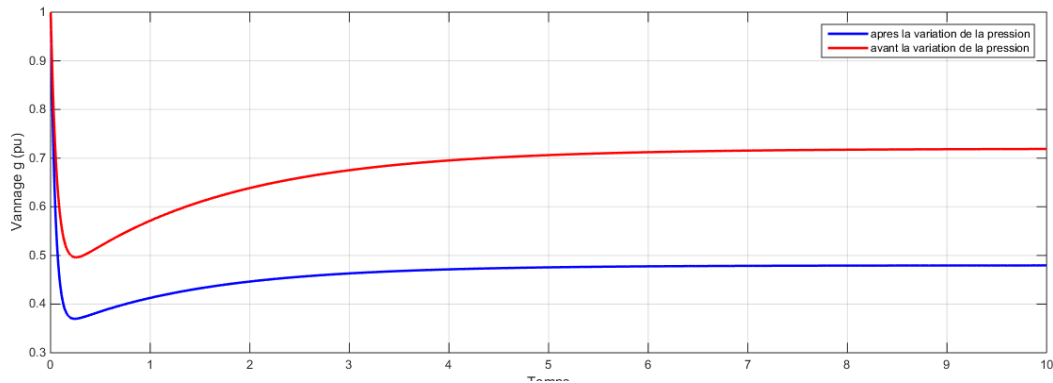
Nous voyons à travers les courbes (figure 22, 23, 24 et 25) de couple et de puissance une grande et bonne vitesse de réponse, et cela est dû au fait qu'elles sont directement proportionnellement avec le débit, le régulateur PID a été le facteur au sien de régulateur de vitesse de la turbine qui a nui à la vitesse de réponse, ce qui a contribué à la qualité et la précision des résultats.

## 8 Essais d'efficacité du système :

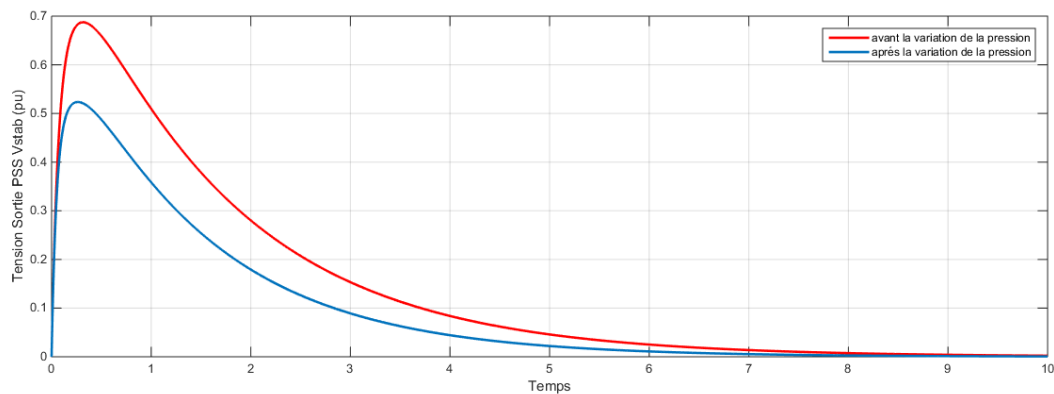
Nous allons faire deux expériences de simulation, la première consiste à créer un changement de pression et la seconde en séparant le stabilisateur de puissance pour voir comment le système réagit, sa vitesse et sa précision avec les résultats précédents.

## 8 - 1 Essai d'efficacité par la variation pression :

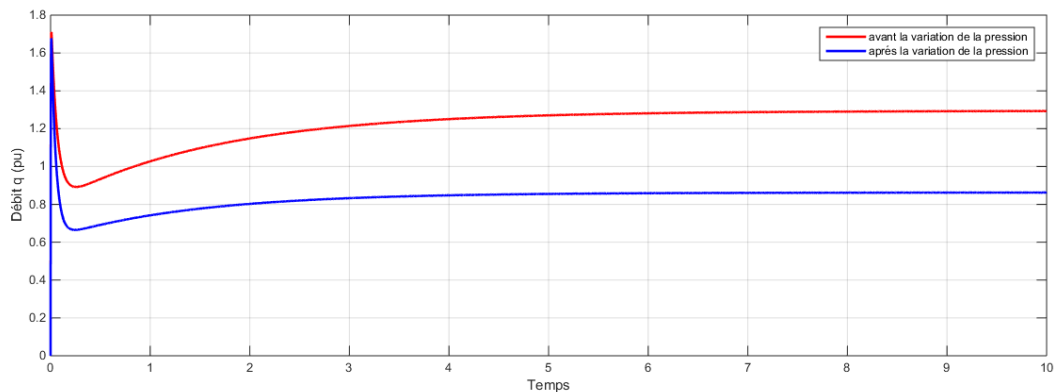
Nous allons créer un scénario pour créer une perturbation pour voir si le système va interagir ou non. C'est en faisant la valeur de la pression = 1,5 pu au lieu de pression = 1 pu les résultats de simulation comme suivants :



**Figure III.24:** Variation vannage  $g$  avant et après la variation de la pression.



**Figure III.25:** Variation tension sortie PSS  $V_{stab}$  avant et après la variation de la pression.



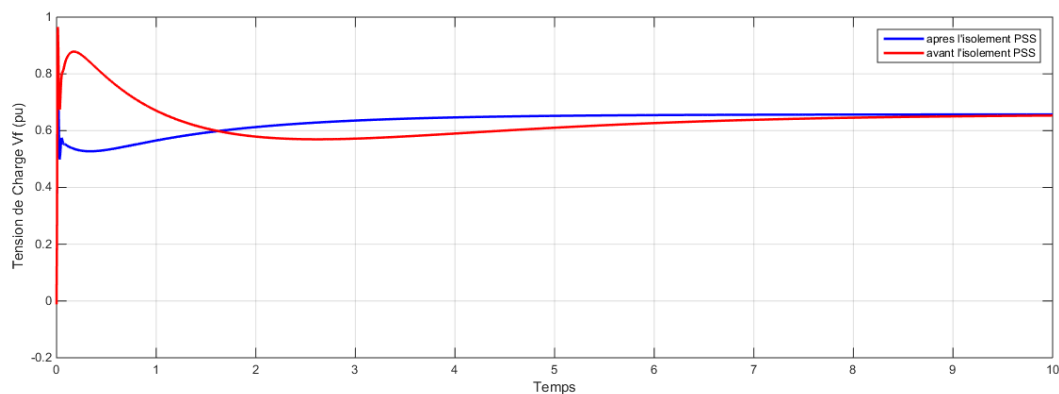
**Figure III.26:** Variation débit  $q$  avant et après la variation de la pression.

### Remarque :

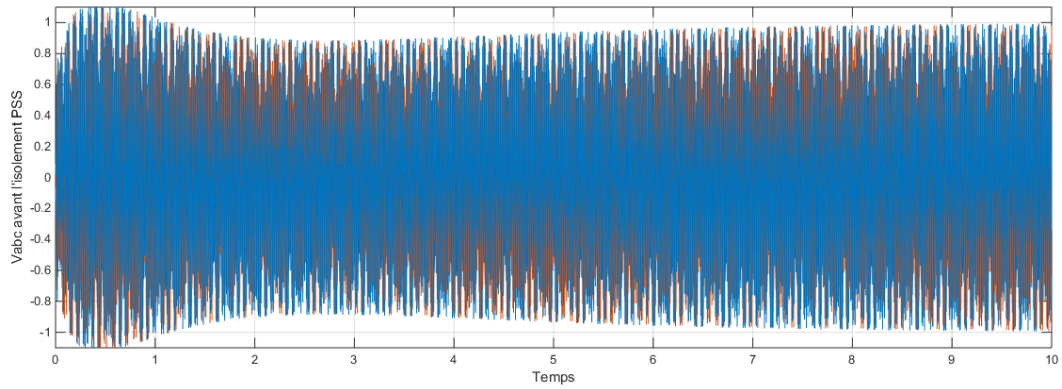
On voit sur les courbes (figures 26, 27 et 28) une bonne vitesse de réponse, et on constate également une diminution de l'amplitude et le reste non affecté par le changement Parce que le changement n'a affecté que le débit car il est inversement proportionnel avec la pression et directement proportionnel avec le vannage, le à celui-ci et le stabilisateur de puissance PSS est rapidement amorti sans influe aux autres systèmes.

### 8 - 2 Essai d'efficacité par l'isolement de stabilisateur de puissance PSS :

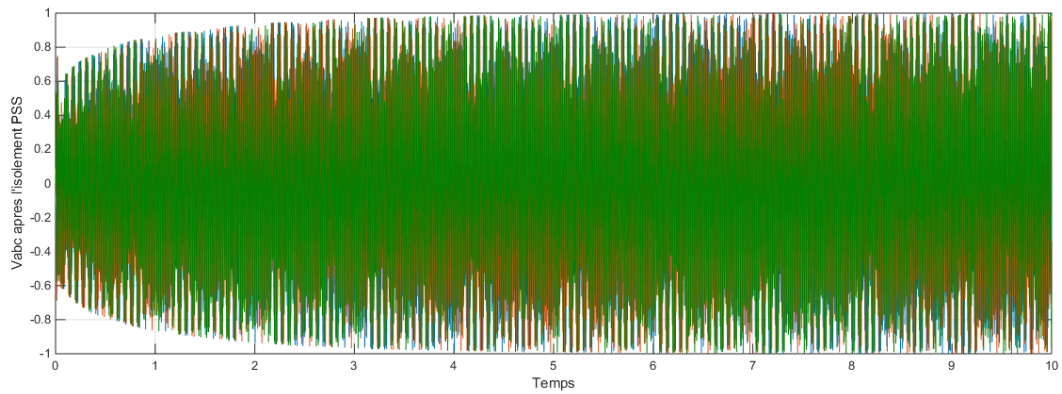
Nous allons créer un scénario pour créer une perturbation pour voir si le système va interagir ou non. C'est en faisant la suppression de stabilisateur de puissance PSS et comparé avec les résultats de simulation avant la négligeassent comme suivants :



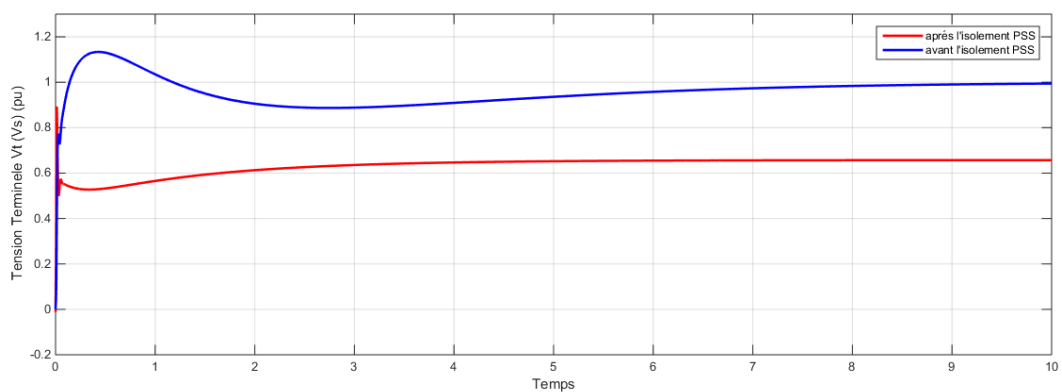
*Figure III.27: Tension de la charge  $V_f$  avant et après l'isolement du PSS.*



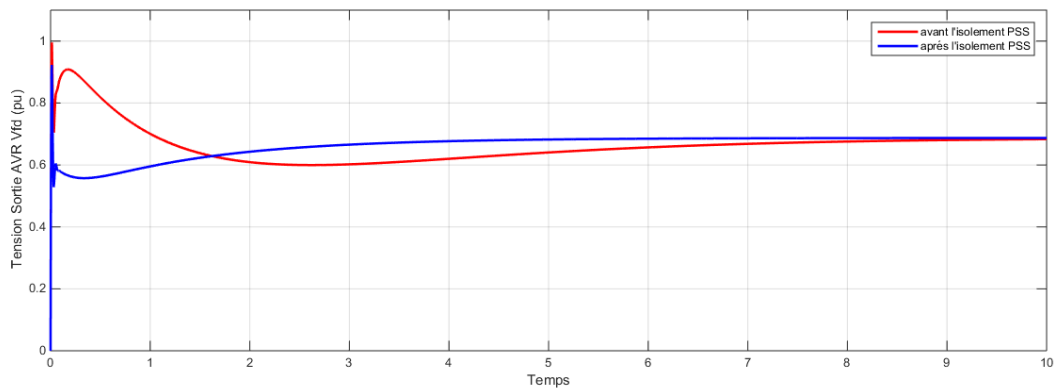
*Figure III.28: Tension  $V_{abc}$  avant l'isolement du PSS.*



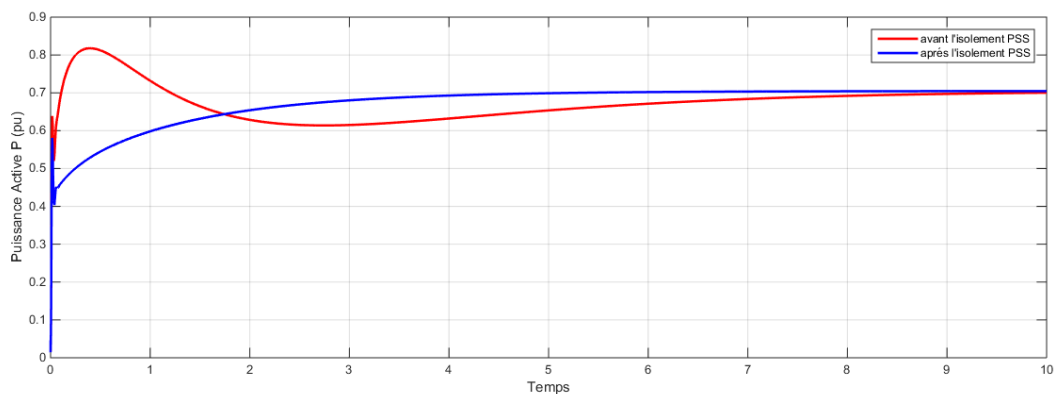
*Figure III.29: Tension  $V_{abc}$  après l'isolement du PSS.*



*Figure III.30: Tension terminale  $V_t$  avant et après l'isolement du PSS.*



**Figure III.31:** Tension sortie AVR  $V_{fd}$  avant et après l'isolement du PSS.



**Figure III.32:** Puissance active  $P$  avant et après l'isolement du PSS.

### Remarque :

Nous voyons à travers les courbes une vitesse en réponse et il y a des dépassements lorsque le stabilisateur d'énergie est connecté et c'est dans la période entre 0 et 0,5 seconde et après cela, nous remarquons une stabilité et une correspondance apparente à travers les courbes considérablement

Vous êtes toujours hors ligne nous avons remarqué une douceur mais une réponse lente et sans dépassement et le résultat à la fin la tension du générateur est stable et sans dépassements.

## 9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons assemblé le système qui se compose de plusieurs systèmes électriques tels que le régulateur de tension AVR, le stabilisateur de puissance PSS et le régulateur de vitesse de turbine GOV. Nous avons implémenté ce système sous MATLAB-Simulink, ce qui nous a permis de nous connecter et de voir le processus général pendant leur fonctionnement. Les résultats sont validés par les courbes de puissance, vitesse, courant et couple sous l'influence des charges électriques.

En fin de compte, nous avons travaillé. Nous avons étudié l'effet des régulateurs sur le fonctionnement du système dans des situations fugaces et leurs capacités à restaurer la stabilité du générateur dans un état stable après avoir connu des perturbations fugitives. Les résultats de la simulation montrent l'importance et le rôle des régulateurs dans les réseaux électriques pour faire face aux erreurs les plus fréquentes.

**Chapitre IV :**  
**Optimisation de**  
**dimensionnement de central**  
**et étude technico-**  
**économique**

# 1 Introduction

La turbine constitue le cœur de l'installation hydroélectrique. D'après PACER (1995b), la conception hydraulique d'une turbine est déterminée par le débit de l'eau ainsi que la hauteur de chute d'un emplacement particulier. La turbine doit aussi tourner à une vitesse conforme à la vitesse d'un alternateur.

## 2 La Sélection d'une turbine

La figure 1 montre que les caractéristiques d'efficacité varient considérablement d'un type de turbine à l'autre. De façon générale, avant de porter son choix sur la meilleure conception pour un emplacement, les points suivants doivent être pris en considération:

- Utiliser une seule turbine ou en utiliser plusieurs ;
- Utiliser des turbines à hélices (aubages fixes) ou des turbines Kaplan (aubages à pas variables) ;
- Utiliser des turbines Francis ou des turbines Pelton.

Le tableau suivant propose une autre appréciation de la différence présente entre les principaux types de turbines.

|                                    | <b>Pelton</b> | <b>Francis</b> | <b>Kaplan</b> |
|------------------------------------|---------------|----------------|---------------|
| <b>Vitesse spécifique (tr/min)</b> | 3 à 36        | 30 à 400       | 300 à 1000    |
| <b>Hauteur de chute (m)</b>        | 100 à 1000    | 15 à 300       | 2 a 30        |
| <b>Puissance jusqu'à (MW)</b>      | 15            | 15             | 15            |
| <b>Rendement (%)</b>               | 93            | 94             | 94            |

*Tableau IV. 1: comparatif pour les trois principaux types de turbines.*

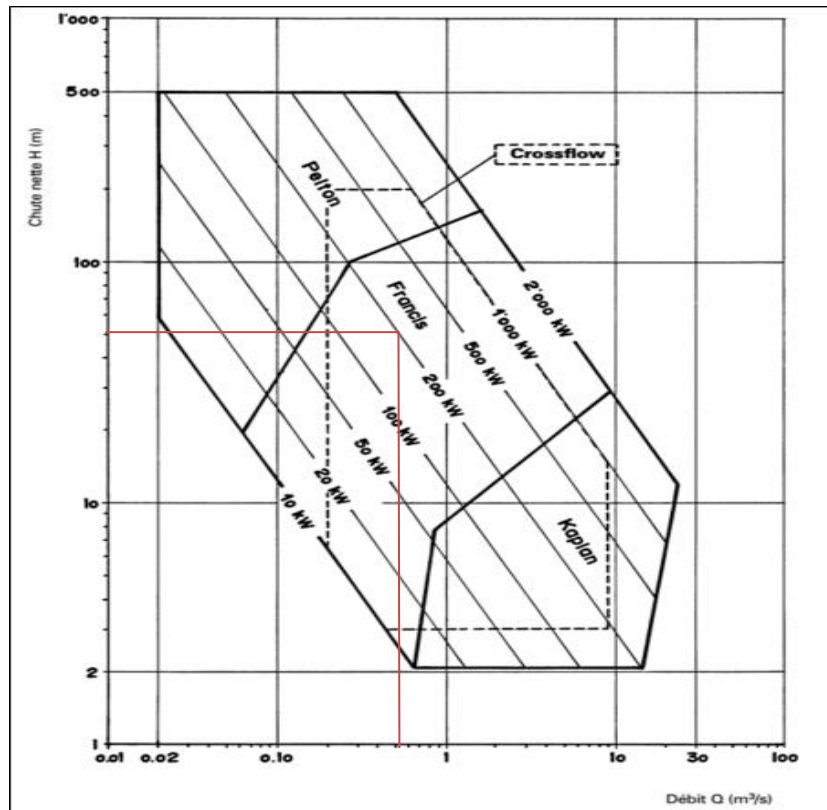


Figure IV.1: Graphique des caractéristiques.

La forme des courbes de rendement ainsi que les valeurs des maximums, présentées dans la figure 2, permettent une autre comparaison entre les divers types de turbines.

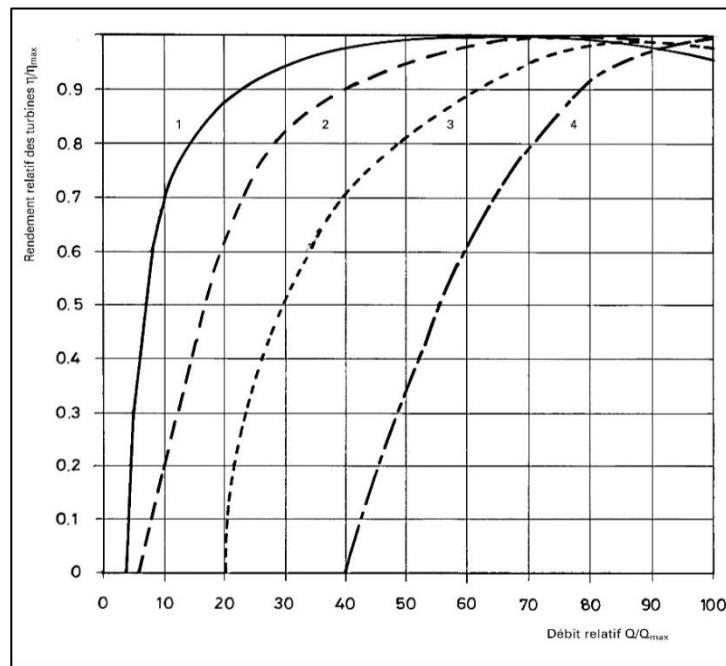


Figure IV.2: Forme des courbes de rendement de différentes turbines pour des débits

Ordre de grandeur des rendements maximum  $\eta_{\max}$ :

- Courbe1 : Turbine Pelton  $\eta_{\max}=84-90\%$   
Turbine Cross flow à 02 cellule  $\eta_{\max}=78-84\%$
- Courbe2 : Turbine Kaplan  $\eta_{\max}=84-90\%$
- Courbe3 : Turbine Francis  $\eta_{\max}=84-90\%$   
Turbine Cross flow à 02 cellule  $\eta_{\max}=78-84\%$
- Courbe4 : Turbine Pelton  $\eta_{\max}=75-90\%$

L'abaque représentée par la figure 18, permet la sélection ainsi que la comparaison des divers types de turbines en prenant en compte leur **vitesse de rotation**.

Cet abaque montre bien que deux, voire même trois types de turbines, peuvent être considérés pour un site donné :

- Pelton / Francis / CrossFlow pour les chutes moyennes ;
- Francis /CrossFlow/ Kaplan pour les chutes faibles.

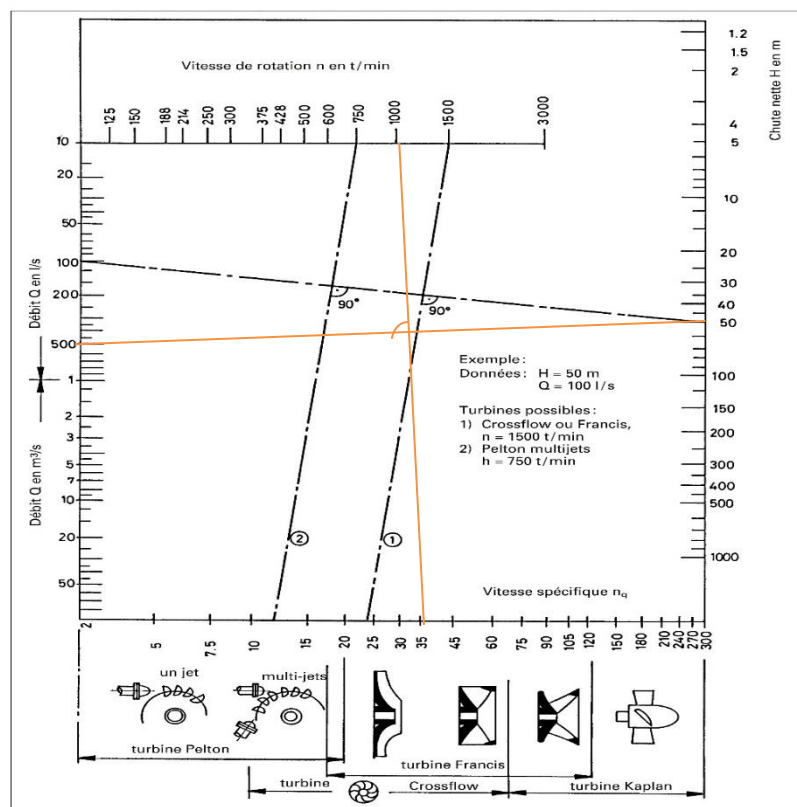


Figure IV. 3: Abaque de sélection de différents types de turbines.

## **3 Le groupe turbine-générateur**

### **3 - 1 Les générateurs**

Une fois mise en mouvement, une turbine entraîne directement, ou par l'intermédiaire d'un multiplicateur, un générateur de courant qui transforme l'énergie mécanique disponible sur l'arbre en énergie électrique. Il existe trois types de générateurs.

#### **3 - 1 - a Génératrice à courant continu**

La production de courant continu n'est envisageable que dans peu de cas. Si l'énergie est produite pour un usage domestique, elle est envisageable pour le chauffage et l'éclairage. Le principal avantage de la génératrice à courant continu, outre son faible prix, est que sa production peut être stockée dans des batteries. Il y a possibilité de conversion du courant continu en alternatif avec un onduleur, mais cet appareillage est généralement coûteux.

#### **3 - 1 - b Génératrice synchrone**

Cette génératrice de courant est aussi appelée alternateur. Sa caractéristique vient du fait que la fréquence du courant produit est imposée par la vitesse de rotation du rotor, qui doit donc rester constante pendant la période d'exploitation. Cette machine est généralement utilisée lorsque l'installation est conçue pour l'autoconsommation. La génératrice synchrone a de bons rendements, mais son prix pour les faibles puissances est moins intéressant que celui des autres types de générateurs.

#### **3 - 1 - c Génératrice asynchrone**

Elle est essentiellement utilisée lorsque la centrale est prévue pour une vente aux réseaux de distribution électrique, car dans ce cas elle est pilotée par le réseau qui régule la fréquence et la tension du courant produit.

Il est à noter que les rendements de la génératrice asynchrone sont moins intéressants que ceux de l'alternateur.

### 3 - 2 Les régulateurs

La variation de la vitesse de rotation des turbines doit demeurer à l'intérieur de limites très étroites afin de maintenir une fréquence électrique normalisée. La vitesse est contrôlée par un régulateur qui détecte les changements de vitesse Il y a trois manières de maintenir constante la vitesse de rotation d'une turbine:

- Au moyen du réseau électrique avec régulation niveau - débit ;
- Au moyen d'un régulateur électronique charge - fréquence et niveau - débit ;
- Au moyen d'un régulateur vitesse – débit.

### 3 - 3 Vitesse de rotation du groupe turbine - générateur

La vitesse de rotation d'un générateur est liée à la fréquence constante du réseau 50 Hz. Les générateurs synchrones, selon leur nombre de pôles, tourneront aux vitesses suivantes:

- 1 paire de pôles  $n= 3000$  tr/min
- 2 paires de pôles  $n=1500$  tr/min
- 3 paires de pôles  $n= 1000$  tr/min
- 4 paires de pôles  $n=750$  tr/min
- 5 paires de pôles  $n=600$  tr/min
- 6 paires de pôles  $n=500$  tr/min

Les vitesses de rotation des générateurs asynchrones seront supérieures de 1 à 2% aux valeurs indiquées. Ceci est nécessaire pour créer le champ magnétique dans la machine.

#### **En pratique :**

La vitesse maximum est limitée à 1500 tr / min (2 paires de pôles), pour tenir compte de la survitesse de l'emballement. Celle-ci provoque des contraintes mécaniques très importantes au-delà. De ce fait, des génératrices à une paire de pôles ne sont que rarement installées (vitesse d'emballement 6 000 tr / min).

En dessous de 600 tr / min (6 paires de pôles et plus), le volume du générateur, donc son prix par rapport à la puissance installée, augmente parallèlement à une baisse du rendement due à une augmentation des pertes, en particulier magnétiques.

Lorsque la vitesse de rotation de la turbine est inférieure à 600 tr /min, elle entraîne généralement une génératrice à faible nombre de pôles (1000 ou 1500 tr / min) par l'intermédiaire d'une transmission à courroie ou d'un multiplicateur à engrenages par exemple.

## 4 Choix du type de turbine

### 4 - 1 Choix théorique de la turbine

La sélection du type de turbine à utiliser, se fait en prenant compte plusieurs paramètres. Le choix est donc tributaire du débit nominal  $Q_n$  (ou débit turbinable  $Q_t$ ) et de la pression disponible  $P_r$  (hauteur manométrique  $H$  à disposition) comme le montre la figure 18 dans la partie bibliographique.

La zone d'étude est caractérisée par un débit moyen de 100 l/s et une pression utile moyenne de 16 bars correspondant à une hauteur de chute fictive moyenne de 160 m. En projetant ces paramètres sur l'abaque de sélection des différentes turbines, nous obtenons le type de turbine idéalement choisi :

- Pour un nombre de tour inférieur ou égal à 1000 tr/min < *Turbine à action* (Pelton);
- Pour un nombre de tour supérieur ou égal à 1000 tr/min < *Turbine à réaction* (Francis).

L'apparition de deux types de turbines différentes pour les mêmes paramètres est expliquée par une zone de chevauchement entre les turbines sur l'abaque.

Le choix ne sera jamais fait s'il n'y a pas une bonne classification des turbines en fonction de leur vitesse spécifique  $n_q$  définie en tant que vitesse de rotation en tours par minute d'une turbine travaillant sous une chute de 50 m avec un débit de 0.5 m<sup>3</sup> /s.

$$n_q = n \cdot \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}} \dots \dots \dots (01)$$

Avec :

**H**:Hauteur manométrique (m).

**Q**:Débit (m<sup>3</sup> /s).

**n**:Vitesse de rotation (tr/min).

De ce fait, l'installation de turbines de type *Francis* dans toute cette zone, reste le choix le plus judicieux.

## 4 - 2 Eléments de synthèse

### 4 - 2 - a La vitesse de rotation de la roue de la turbine

L'eau sous pression entrant dans la turbine exerce une force hydrodynamique sur les augets de la roue. Cette force crée un couple mettant la roue en rotation.

Celle-ci tourne à une vitesse  $v$  déterminée par les conditions d'exploitation, surtout pour le nombre de tours par minute  $N$ .

### 4 - 2 - b Le générateur de courant

Une fois mise en mouvement, la turbine entraîne le générateur de courant, qui transforme l'énergie mécanique disponible sur l'arbre en énergie électrique. La fréquence du générateur de courant est un nombre multiple du nombre de tours de l'arbre d'entraînement. La génératrice est séparée de la turbine par un bouclier spécial qui la préserve de tout contact avec l'eau.

Le choix du générateur dépend essentiellement de l'utilisation de l'énergie produite.

### 4 - 2 - c La puissance mécanique

La puissance mécanique que fournit l'arbre de la turbine est donnée par le produit du couple et de la vitesse de rotation.

$$P_{mec} = \frac{W}{t} = F \cdot \frac{l}{t} = F \cdot v = \omega \cdot F \cdot R = \omega \cdot C \dots\dots\dots(02)$$

La mesure de la vitesse de rotation est simple à réaliser; celle qui sollicite le couple- mètre est délicate et en plus ces mesures ne sont pas nécessaires pour le but recherché (le rendement).

**4 - 2 - d La puissance électrique**

La puissance électrique dissipée et l'énergie électrique sont reliées par la durée de consommation.

La puissance électrique est la puissance directement disponible à la sortie du générateur. Elle s'obtient à partir des grandeurs tension, courant et facteur de qualité fournis par le constructeur et par le potentiel exploitable (puissance hydraulique) et les rendements de la turbine et du générateur.

$$P_{elec} = \eta_t \cdot \eta_g \cdot Q_t \cdot P \dots\dots\dots(03)$$

L'énergie électrique produite indique la capacité de production de la microcentrale hydroélectrique.

L'énergie électrique produite durant une période s'obtient par intégration.

$$E = \int P_{elec} \cdot dt \Rightarrow E = \eta_t \cdot \eta_g \cdot \rho \cdot g \cdot H \int dV \dots\dots\dots(04)$$

L'énergie électrique est alors directement liée au volume d'eau consommé.

**4 - 2 - e Le rendement**

Toute transformation d'énergie dans une machine donne lieu à des pertes. Il s'ensuit que la puissance obtenue à l'arbre de la turbine  $P_{mec}$ , servant à entraîner la génératrice, est inférieure à la puissance hydraulique  $P_{hyd}$  (le potentiel exploitable).

La qualité de la turbine est définie par le rendement  $\eta_t$  c'est un paramètre traduisant le rapport entre ces deux puissances.

$$\eta_t = \frac{P_{mec}}{P_{hyd}} \dots\dots\dots(05)$$

Le rendement de la génératrice prend aussi la même forme

$$\eta_g = \frac{P_{elec}}{P_{mec}} \dots\dots\dots(06)$$

Cependant, il arrive de prendre un rendement général du groupe turbine-générateur qui est sous la forme :

$$\eta_T = \frac{P_{elec}}{P_{hyd}} = \left( \frac{P_{elec}}{P_{mec}} \right) \cdot \left( \frac{P_{mec}}{P_{hyd}} \right) \eta_g \cdot \eta_t = Rdt \dots\dots\dots(07)$$

Ce rendement global varie entre 0,7 et 0,9 en fonction du type de turbine et du générateur utilisés.

L'énergie électrique produite pendant une année est **la principale grandeur** permettant de déterminer la rentabilité de l'ouvrage.

### 4 - 3 Calculer la puissance et l'énergie d'une turbine

Le principe de la production d'énergie électrique à partir de l'eau (hydroélectricité) est le suivant : un circuit de canalisation d'eau génère une pression hydraulique de l'eau qui passe à travers les pales d'une turbine qui entraîne une génératrice qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

#### 4 - 3 - a Formule pour calculer la puissance hydroélectrique

Pour calculer la puissance en sortie d'une turbine hydroélectrique, La formule de base est:

$$P = Q * \rho * g * H * \eta \dots\dots\dots(08)$$

Avec :

P = Puissance mécanique en kW

Q = débit d'eau dans la canalisation (m<sup>3</sup>/s)

$\rho$  = densité de l'eau (kg/m<sup>3</sup>)

g = constante gravitationnelle de Newton (m/s<sup>2</sup>)

H = hauteur de chute (m)

$\eta$  = ratio de rendement (généralement entre 0,7 et 0,9)

### 4 - 4 Calcul de la production énergétique hydroélectrique

Nous allons appliquer les paramètres qu'on a pour calculer la puissance exploitable vos valeurs dans les cases blanches, les résultats sont affichés dans les cases vertes. Haut du formulaire

#### 4 - 4 - a Potentiel d'énergie de l'eau

Si on prend les données qu'on a pour les 04 forage :

Débit: 0.5 m<sup>3</sup>/s

Diamètre de la canalisation : 630 cm

Section ode la canalisation : 28.2743 m<sup>2</sup>

Constante gravitationnelle : 9.81 m/s<sup>2</sup>

Hauteur de la chute d'eau : 50 m

Densité : 1000 kg/m<sup>3</sup> (généralement 1000 kg/m<sup>3</sup> pour l'eau)

Après application de l'équation (08) nous obtenons la Puissance maximale avant pertes: 245 kW

#### **4 - 4 - b Pertes de rendement et énergie électrique réellement disponible en sortie de la turbine**

Après avoir obtenir les rendements électrique et mécanique de central par un fabricant qui sont :

Rendement de la turbine : 92 %

Coefficient de pertes de charge : 95%

Autres pertes 98%

Efficacité globale 81%

nous avons obtenu que la puissance électrique utile (en kW)est de : 206 kW

#### **4 - 5 Choix d'un fournisseur**

D'après les recherches qu'on fait sur internet et voir les fournisseurs disponibles de turbines nous avons consulté un fournisseur chinois qui nous a recommandé après échange de données que la meilleure turbine qui nous conviens c'est la turbine Francis avec une puissance de 200 KW vue que nous désirons l'exploité pour faire fonctionner que les moteurs de tour de refroidissement d'une puissance totale de 150 kW, en annexe1 la fiche technique de refroidisseur et une fiche technique de la turbine avec accessoires et le prix d'achat en Dollars.

## 5 Impacts techniques et économique par l'intégration de nouveau système :

La puissance hydraulique disponible actuellement avec les puits en exploitation est considérable; environ 50 kW pour chaque forage. Il arrive que cette puissance dépasse les mégawatts dans certaines régions.

Une telle puissance hydraulique peut être utilement exploitée pour sa transformation en énergie électrique à travers des groupes turbine - génératrice.

Toutefois, nous devons considérer que l'énergie hydraulique disponible diminuera graduellement dans le temps à cause du vieillissement des puits, de la construction d'autres puits productifs et de la croissante interférence des champs des puits voisins (M'ghaier, Djamaa et Touggourt) et donc, le dimensionnement de ces groupes devra tenir compte de ces facteurs.

### 5 - 1 Conséquences de l'intégration de la turbine

L'intégration du groupe turbine – génératrice n'est pas sans incidences sur l'environnement immédiat du forage.

Les groupes turbine – génératrice sont, pour la plupart des cas, installés sur le toit de la tour de refroidissement. Il sera donc nécessaire de modifier la conduite actuelle afin de permettre une pression acceptable et durable à l'amont de la turbine. A l'entrée de la turbine, une vanne de fermeture et une vanne de *by-pass* sont d'une grande utilité.

Cependant, cette étroite collaboration entre "l'hydraulique" et "la mécanique" nous laisse bénéficiaire presque sur tous les plans.

Avant l'incorporation de la turbine, l'eau sortait à une pression élevée et non négligeable, suit le chemin des conduites au niveau du refroidisseur, passe par les plaques de séparation pour aboutir dans un bassin à la pression atmosphérique.

La perte et l'inutilisation de toute l'énergie initiale de l'eau sont la conséquence de ce circuit. Après insertion de la turbine, l'utilisation de la plus petite énergie disponible rend l'installation **très rentable** dans le temps.

L'exploitation de cette centrale hydroélectrique nous permet de récupérer toute l'énergie émise pour faire fonctionner les deux tours de refroidissement vu que la

puissance de moteurs est 75 kW pour chacun d'eux et que la puissance de la turbine choisi est de 200 KW.

## 5 - 2 Considérations économiques

L'installation d'un tel dispositif pour la production de l'énergie électrique est un investissement à très haute rentabilité puisque les moyens mis en place n'entravent en aucun cas le fonctionnement quotidien. Il s'implante en parallèle et ne nuit en rien; tout ce qu'il rapporte est un gain.

Cependant, l'investissement nécessaire pour la réalisation de ces installations exige de prendre en considération :

- Le génie civil;
- Le groupe turbine - génératrice;
- Les tuyauteries et les vannes;
- Ainsi que les coûts d'installation.

### 5 - 2 - a Production d'énergie hydro-électrique et gain financier

Nous pouvons estimer le gain qu'on peut l'avoir après une année d'exploitation de centrale comme il est montré : Pour un prix de Nombre moyen de jours de production par an : 365 jours l'Energie moyenne annuelle en sortie de la turbine hydroélectrique est de :1804560 kWh/an

de cette façon si Coût de l'énergie (du kWh) économisé : 265 DZD/kWh nous obtenons un Total du gain financier de : 345 888 600.00 DZD/an

D'autre part le prix d'achat de centrale est de : 7 200 000.00 DZD

## 5 - 3 Impact de l'intégration de la turbine sur les exploitations de l'usine de déminéralisation d'eau

L'eau arrive en tête de forage à une pression de 10 à 30 bars et à une température de 40 à 80°C. Cette eau, bien qu'abondante, est inadéquate à l'utilisation direct humaine car sa température est très élevée.

L'eau arrive ensuite à la tête de la tour de refroidissement par le biais des conduites d'acheminement, vers le toit du refroidisseur comme le montre la figure 4.



*Figure IV. 4: Sortie de l'eau sur le refroidisseur.*

L'eau s'infiltré ensuite par des trous à l'intérieur du refroidisseur. Elle est ramenée à la température de 25°C sur la tour de refroidissement par ventilation forcée mettant en jeu le transfert de chaleur par évaporation.

Le refroidissement s'effectue grâce à l'éclatement de l'eau en fines gouttelettes sur des lamelles en métal. L'air atmosphérique, au contact de l'eau s'échauffe et passe de l'humidité ambiante à une humidité proche de la saturation en évaporant une partie de l'eau à refroidir (figure 5).



*Figure IV. 5: conduite d'amener des eau de forage*

Comme la tour de refroidissement est à ventilation forcée, l'extraction de l'air chaud et humide s'effectue par le biais d'un extracteur de 5 m de diamètre, nécessitant ainsi un moteur de 75 kW de puissance fonctionnant sous 380 V (figure 6). Les caractéristiques du moteur utilisé sont présentées en annexe 01.



*Figure IV. 6: Extracteur d'air chaud du refroidisseur*

Toute cette puissance est puisée du réseau public de distribution électrique. Cependant et grâce à la présence de l'énergie hydraulique disponible dans l'eau de la nappe du Continental Intercalaire, nous évitons de ramener de l'énergie de l'extérieur et gaspiller celle déjà disponible.

A partir des connaissances acquises, nous savons maintenant que l'énergie disponible dans l'eau d'un seul forage peut suffire largement à l'extracteur, annuler le montant de la facture électrique annuelle et atténuer celle de l'exploitation.

#### **5 - 4 Impact de l'intégration de la turbine sur l'environnement**

Toute réalisation d'aménagement hydroélectrique soulève des problèmes d'environnement et d'aménagement de territoire. Ils doivent toujours s'inscrire dans le volet du développement durable. Mais dans la plupart des cas, les précautions, les règles de l'art et les solutions techniques permettent aujourd'hui de limiter l'impact de ces installations sur l'environnement local à un niveau tout à fait acceptable.

## 6 résultat d'optimisation de dimensionnement :

Ces turbines conseillées à être installées ou à concevoir doivent présenter les caractéristiques suivantes :

✓ **Le groupe turbine – génératrice est composé de :**

- Groupe turbine complètement en acier inox.
- Générateur synchrone triphasé à axe horizontal avec la turbine, directement emboîté sur l'arbre.
- Capteurs pour le contrôle de la température sur les roulements et les enrroulements.
- Résistances électriques anti-condensation.
- Bac de distribution en acier inox.

✓ **Le tableau électrique d'automatisation et de contrôle :**

- Armoire en acier inox.
- Télé rupteur à commande motorisé triphasé avec ouverture.
- Analyseur d'énergie avec indicateur de valeurs de tension, de détecteur de phase, courant, puissance produite,  $\cos\varphi$ , énergie produite et autres fonctions.
- Protection pour une production en basse tension.
- Groupe de mise en phase.
- Sectionneur pour la mise en phase.
- Tachymètre pour le contrôle du nombre de tours.
- Transformateur auxiliaire.
- Contacts pour commande de la vanne générale à actionnement automatique par servomoteur.

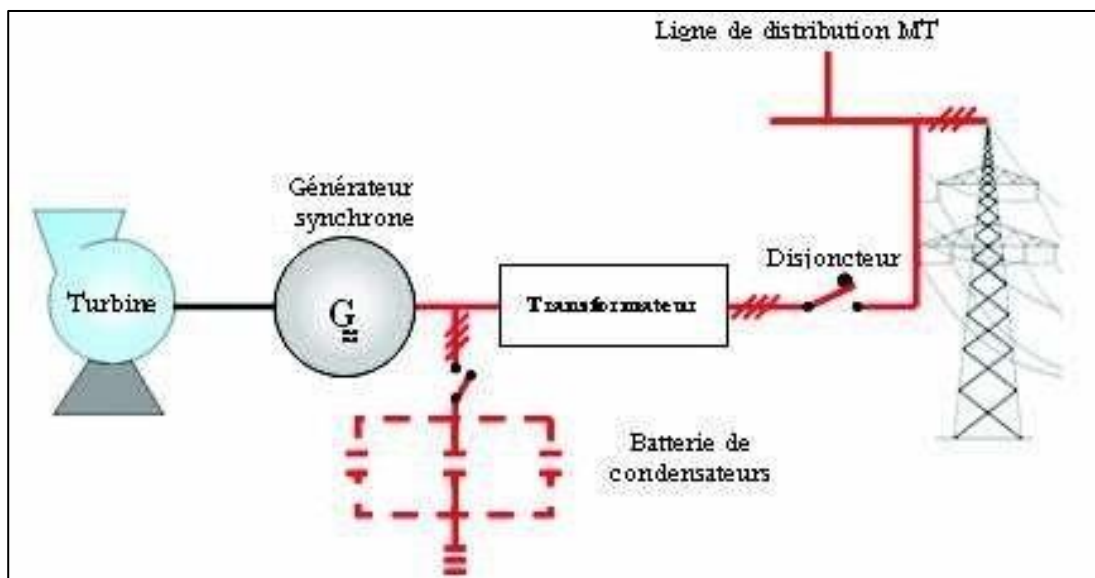
✓ Les données techniques de cette microcentrale hydroélectrique sont :

- Tension nominale : triphasé 400 V 50 Hz.
- Hauteur manométrique utile :  $H = 50$  m.
- Débit utilisé :  $Q = 0.5$  m<sup>3</sup>/s.
- Puissance électrique produite :  $P = 200$  kW environ.
- Puissance électrique maximale :  $P_{\max} = 210$  kW.

Des photos présentent le groupe turbine – génératrice en un seul bloc qui nous a été proposé par un fournisseur chinois en annexe 01.

La turbine génératrice prévue sera essentiellement utilisée lorsque la production électrique serait destinée pour l'injection au réseau national (figure 7), dans ce cas la génératrice est pilotée par le réseau. Celui-ci régule la fréquence et la tension du courant produit à sa convenance. Elle comporte un rotor sans bobinage apparent. Le courant qui circule est produit, par induction et ce à partir des bobinages du stator.

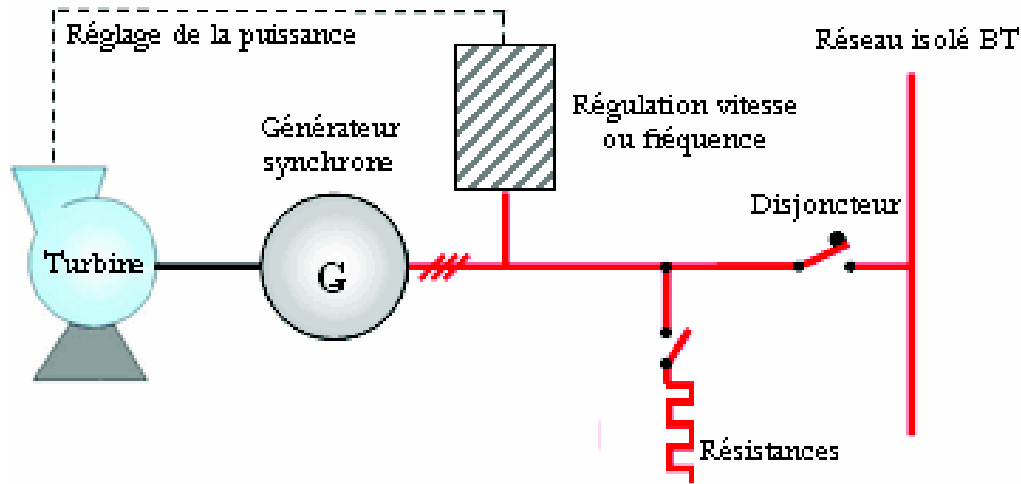
En sortie de générateur, un transformateur élève la tension produite à une valeur égale à celle des lignes de transport de l'électricité.



*Figure 1: Schéma type d'équipements de production électrique en réseau connecté.*

La production peut être destinée à l'autosuffisance (figure 8), dans ce cas, les

générateurs sont synchrones; ils sont mieux adaptés. Cependant, la vitesse de rotation de la génératrice doit rester strictement constante pour que la fréquence du réseau demeure stable.



**Figure 2:** Schéma type d'équipements de production électrique en réseau isolé

Ce travail étant unique dans son genre, servira de modèle pour les futurs travaux concernant l'exploitation de l'eau de la nappe du Continental Intercalaire. Il a servi aussi comme base de lancement de créativité et d'innovation. Par exemple, la création d'un nouveau modèle de dispositif d'utilisation de l'énergie hydraulique à gabarit très réduit, à efficacité très rentable. Ce nouveau modèle ne concerne pas uniquement les eaux de la nappe albienne, il concerne aussi l'hydraulique urbaine.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion Générale

Nous savons tous que, tant pour l'énergie solaire ou éolienne, l'appel à une technologie avancée est la bienvenue. Les ressources solaire et éolienne sont gratuites mais leur mobilisation est largement payante.

C'est pour diminuer notre dépendance à vouloir trop payer le renouvellement des techniques d'exploitation que nous avons orienté notre travail vers l'utilisation d'une nouvelle forme d'énergie. Nous ne qualifierons pas cette énergie de "renouvelable", mais le terme "énergie douce" semble coller à notre définition.

Il nous paraît nécessaire dans l'immédiat d'attirer l'attention sur ces énergies, non pas pour développer une production massive, mais pour économiser, contrôler et bien orienter la distribution de l'énergie classique; le développement durable est ainsi respecté.

Nous avons acquis, à partir de l'étude, les résultats suivants :

- La nappe albienne est un énorme accumulateur fournissant de l'énergie sans retenue et ce pendant longtemps. La durée de vie de cette énergie est limitée à 40 ans au minimum selon les simulations déjà faites; sous réserve de changements climatiques importants;
- L'énergie générée par un forage d'usage courant est de l'ordre d'une centaine de kilowatts. L'estimation minimale est à 35 kW dans pratiquement tous les points artésiens;

Il est urgent, pour établir des plans cultureux adaptés aux nouvelles données, de se pencher dès lors sur les deux points suivants :

- Des études beaucoup plus poussées par association avec des fabricants de turbines pour les petites centrales hydroélectriques sont souhaitées;
- Dans l'attente de la finalisation de la turbine propre aux forages albiens, l'adaptation des turbines existantes - le plus tôt possible - est conseillée.

L'énergie albienne n'est pas éternelle, mais elle est tout de même non exploitée jusqu'à présent.

Le travail que nous avons élaboré est similaire aux travaux avancés actuellement et mis au point par les grands pays industriels par utilisation des courants des fonds marins.

### **1- Perspectives de développement**

La réhabilitation des forages en vue de l'exploitation énergétique est une priorité absolue. Ceci suit le développement de nouvelles réalisations dans le domaine des turbines hydrauliques.

La production d'énergie additionnelle résultant de l'exploitation d'une énergie hydraulique négligée depuis longtemps s'avère particulièrement rentable.

Dans la majorité des cas, ce mode de production d'énergie inédit jusqu'à présent est un des moyens pour faire face à l'accroissement excessif du prix du kilowattheure.

Comme nous l'avons précédemment dit, l'énergie hydraulique disponible actuellement diminuera graduellement, c'est pour cette raison que l'adaptation de ce dispositif au forage s'avère indispensable aujourd'hui, vu que la rentabilité de son installation dépend du temps.

La généralisation de ce type d'adaptation et ainsi l'augmentation des puissances hydrauliques sont aussi envisageables, grâce aux progrès technologiques dans différents domaines. Ainsi par exemple, les moyens de calcul numériques actuels permettent d'aborder des calculs d'écoulement impossibles à réaliser il y a quelques années. L'optimisation des géométries par calcul aide à la conception de turbines plus puissantes et efficaces dans différentes conditions d'utilisation et donc laisse des plages de fonctionnement plus larges.

Nous nous sommes rapprochés d'une société chinoise spécialisée dans les turbines; elle nous a proposé des pico et des microcentrales hydroélectriques que nous pouvons adapter aux forages albiens.

# **BIBLIOGRAPHIE**

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Mustapha LABBACI et Samir MEZIANE, «Modélisation et simulation d'un ensemble turbine-alternateur en mode isochrone. », Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE Filière Génie Electrique Spécialité Machines électriques , UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2015
- [2] Michel LAJOIE-MAZENC et Philippe VIAROUGEN Technique de l'ingénieur, alimentation des machines synchrones. **Juin 1991.**
- [3] MouadOubidar Thèse de doctorat (Modélisation de la machine synchrone et asynchrone), université de Québec, 2010.
- [4] J. Chatelain chapitre 9, Terminale Génie Electrotechnique. Collection traité d'électricité. Année 1989
- [5] Pierre WETZER Techniques de l'Ingénieur, D3 545excitation des machines synchrone. Date de publication :10 févr. 1997
- [6] F. Runcos, R. Carlson, N. Sadowski, P. Kuo-Peng, H. Voltolini "performance and Vibration Analysis of a 75 kW Brushless Double Fed Induction Generator Prototype" IAS, Vol. 5, 2006, P 2395-2402.
- [7] KHALED OURAMDANE, Mémoire de la maîtrise en ingénierie (modélisation et optimisation du système d'excitation du groupe turbine-alternateur du simulateur analogique d'hydro-quebec), université de Québec, MAI 2015.
- [8] P.Kundur. "Power System Stability and Control" , New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [9] Hajagos, L.M. ; Basler, M.J. "Recommended practice for excitation system models for power system stability studies". Changes to IEEE 421.5 Power Engineering Society General Meeting 2005 IEEE.
- [10] Dr.Dhiya Ali Al-Nimma, Dr. Majid Salim Matti, "Reactive Power Control of an Alternator with Static Excitation System Connected to a Network", Mosul University, Vol.18, N°3, June 2010.
- [11] M.S. Ghazizadeh, F. M. Hughs, "A Generator Transfer Function R egulator for Improved Excitation Control", IEEE Trans on. Power Systems, Vo1.13, N°2, May 1998, pp. 437- 441.
- [12] P.M.Anderson, A.A Fouad. "Power System Control and Stability", IEEE Press, 2003.
- [13] Prepared by the IEEE Working Group on Computer Modelling of Excitation Systems."Excitation system models for power system stability studies", IEEE committee report, February 1981.
- [14] Vladimir Chuvychin, Roman Petrichenko, Nikolay Gurov." Optimization of Excitation System Parameters for Kegums Hydra Power Plant of Latvia".Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011 , 10th International Conference on.
- [15] Q.Zhao.J.Jiang,"Robust Controller Design for Generator Excitation Systems", IEEE Trans on Energy Conversion,Vol.10, N°2, June 1995, pp.201-207.
- [16] Technical Report IEC International Electrotechnical Commission, ref.34-16-2, "Excitation systems for synchronous machines". First edition 1991-02.
- [17] N.Srikanth (M.Tech), Atejasri-M.Tech Dept of IEEE, GIET, Rajahmundry, A.P-India, "Enhancing power system stability by using thyristor controlled series compensator", Vo1.2, Issue 5, September-October 2012, pp 1817-18-24.

- [18] Bhumaiah Jula, M.Tech, Md.ASIF Assoc. Prof, Krishna Enugala, M.Tech. "Simulation for protection of Huge Hydra Generator from Short Circuit Faults", Vol.4, November 2012.
- [19] Wei, and Zheng Xu, Member, IEEE, "Excitation System Parameters Setting for Power System Planning". Power Engineering Society Summer Meeting IEEE 2002.
- [20] J.Machowski and S.Robak, J.W.Bialek, J.R.Bumby, "Excitation control for use with synchronous generators ". IEE Proc-Gener. Trans.distrib, Vo1.145, N° 5 september 1998.
- [21] C.H.Cheng, Y.Y.Hsu, "Damping of Generator Oscillation Using an Adaptive Static Var Compensateur", IEEE Trans on. PowerSystems, Vol. 7, no.2, May 1992, pp.718-724.
- [22] Manuel de formation de la central CAP-DJINET. Siemens 1985.
- [23] BARRET Phillipe, (Régime transitoire des machines tournantes électriques). Eyrolles, 1982.
- [24] F. Rotella, "Commande des systèmes linéaires à plusieurs entrées". Notes de cours, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, 2002, [rotella@enit.fr](mailto:rotella@enit.fr).
- [25] Working Group on Prime and Energy Supply "Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies ". 1992 IEEE trans. Power System.
- [26] BAOUALI BILAL et CHIBANE AMIR, «Etude du Système de Régulation Automatique de la Tension AVR+PSS des Alternateurs de Grande Puissance, Application : Alternateur 176 MW de la Centrale de Cap-Djinet», Mémoire de Master Filière Génie Electrique Spécialité Machines électriques , UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, Juin 2017.
- [27] Régimes transitoire des machines tournantes électriques «2<sup>ème</sup> Edition » de Phillipe Barret 1987.
- [28] Hasni Mourad « identification paramétrique et structurale des machines synchrone par application de divers signaux d'excitation » thèse doctorant d'état ENP 2007.
- [29] Anant Oonsivilai and Padej Pao-La-Or. "Application of Adaptive Tabu Search for Optimum PID Controller tuning AVR System". Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, vol. 3, june 2008.
- [30] Cao Yuan, Ma Jin, "Research on PID Parameters Optimization of Synchronous Generator Excitation Control System", Critical infrastructure (CRIS), 2010 5th International Conference. 20-22 Sept. 2010.
- [31] T.Zabaiou, Member IEEE, Louis-A Dessaint, senior member IEEE, Patrice Brunelle. "Development of new library of IEEE Excitation system and its validation with PSS/E". 2012 IEEE.
- [32] Meng Shen, Student Member, IEEE, Vaithianathan Venkatasubramanian, Member, IEEE, Nicholas Abi-Samra, and Dejan Sobajic, "A New Framework for Estimation of Generator Dynamic Parameters". IEEE transactions on power systems, vol.15, no.2, may 2000.
- [33] C. Ferlat, « Le stockage hydraulique gravitaire et la production hydroélectrique sur les pentes réunionnaises – Etude du stockage de l'énergie photovoltaïque ». [www.island-news.org](http://www.island-news.org), 2009.
- [34] Y. Pannatier, « Optimisation des stratégies de réglage d'une installation de pompage-turbinage à vitesse variable » ; Thèse de Doctorat à l'école polytechnique Fédéral de Lausanne; 2010.
- [35] M. Nasser, « Supervision de sources de production d'électricité hybrides éolien/hydraulique dans les réseaux d'énergie interconnectés ou isolés. », Thèse de Doctorat à l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers ; Paris 2011.
- [36] CORNET. (1961). Initiation à l'hydrogéologie saharienne. Hydraulique et équipement rural. Service des études scientifiques. Rapport, Alger, Algérie. 108p.
- [37] SCHILLER E., R. J. (1998). Le pompage photovoltaïque, manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens. Catalogue. Ed. IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA. Canada.

# **Annexes**

## Annexe 1:

### Configuration list of hydropower project

|  |              |                                  |                      |                              |  |
|--|--------------|----------------------------------|----------------------|------------------------------|--|
| Name of project                                |              |                                  |                      |                              |  |
| Basic parameters                               |              |                                  |                      |                              |  |
| Design head<br>$H_r(m)$                        | 50           | Maximum head<br>$H_{max}(m)$     |                      | Minimum head<br>$H_{min}(m)$ |  |
| Design discharge<br>$Q(m^3/s)$                 | 0.5          | Installed capacity<br>$N(KW)$    | 200                  | Altitude (m) ▽               |  |
| I. Technical parameter of turbine and generato |              |                                  |                      |                              |  |
| Turbine parameters                             |              |                                  | Generator parameters |                              |  |
| Turbine type                                   | HLA550—WJ—45 | Generator type                   | SFW200-6/650         |                              |  |
| Layout pattern                                 | Horizontal   | Layout pattern                   | Horizontal           |                              |  |
| Runner diameter<br>$D_1(cm)$                   | 45           | Rated power<br>$P(KW)$           | 200                  |                              |  |
| Unit speed<br>$n_{11}(r/min)$                  | 63.6         | Rated voltage<br>(V)             | 400                  |                              |  |
| Unit discharge<br>$Q_{11}(L/s)$                | 349          | Rated current I<br>(A)           | 360.9                |                              |  |
| Model efficiency of design point<br>$\eta_m\%$ | 92.7         | Rated power factor<br>$\cos\phi$ | 0.8 (lagging)        |                              |  |
| Prototype efficiency                           | 88           | Excitation voltage               | 40                   |                              |  |

|  |         |  |                   |
|--|---------|--|-------------------|
| of design point $\eta_t\%$                   |         | (V)  |                   |
| Maximum model efficiency $\eta_t\%$          | 92.7    | Excitation current (A)                         | 116               |
| Rated speed $n(r/min)$                       | 1000    | Generator efficiency $\eta_g\%$                | 93                |
| Turbine Rated output P(KW)                   | 215.8KW | Generator speed $n(r/min)$                     | 1000              |
| Maximum axial hydraulic thrust $P_z$ (T)     | 1       | Number of phase                                | 3                 |
| Cavitation coefficient $\sigma$              | 0.055   | Frequency $f$ (Hz)                             | 50                |
| Runaway speed $n_{\text{飞}}(r/min)$          | 1752    | Insulation class                               | F/F               |
| Weight of runner (t)                         | 2       | Excitation mode                                | brushless exciter |
| Weight of turbine (t)                        | 0.2     | Weight of generator (t)                        | 3                 |
| Weight of turbine maximum hoisting piece (t) | 3       | Weight of generator maximum hoisting piece (t) | 3                 |







## 200KW 水轮发电机组及附属设备报价单

### 200kw hydro turbine generator quotation sheet

单位 (USD)

| 品 名 name                             | 图片 Picture  | 数 量<br>quy | 单 价<br>unit<br>price<br>(USD) | 合 价<br>Total<br>price<br>(USD) |
|--------------------------------------|---|------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 水轮机<br>hydro turbine<br>HLA550—WJ—45 |   | 1 台        | 21,700                        |                                |
| 发电机 generato<br>SFW200—6/650         |  | 1 台        | 11,590                        |                                |
| 自动调速器<br>Governor<br>YWT—300(微机)     |  | 1 台        | 7,930                         |                                |

|  |   |            |               |  |
|--|---|------------|---------------|--|
| <p>电动闸阀<br/>Electric gate<br/>valves<br/>Z945T—10DN350</p>   |  | <p>1 台</p> | <p>2,170</p>  |  |
| <p>发电机综合保护屏<br/>6: Switchgear control<br/>panel<br/>( control,<br/>protection,synchronizing<br/>measuring)<br/>PKF-W-200/400</p> |  | <p>2 台</p> | <p>5,070</p>  |  |
| <p>合 计</p>   |   |            | <p>48,460</p> |  |

| SCAM T.P.E.   |  | ITEM N°  | 1                   | REF. N°  | 5783-17-S                        |  |   |     |                      |
|---|--|--|---------------------|--|----------------------------------|--|---|-----|----------------------|
| TECHNICAL SELECTION   |  | REV  | 2                   | DATE   | 19/12/2017                       |  |   |     |                      |
|   |  | MODELE   | 2                   | Q.TY   | CHIALI                           |  |   |     |                      |
|   |  | MODELE   | 2                   | Q.TY   | TAR-7272-Y53                     |  |   |     |                      |
| <b>Contact de la demande d' offre :</b>   |  | <b>Mr. Mohammed CHAIBEDDOUR</b>  |                     | <b>Contact Mail</b> mohammed.chaibeddour@group-chiali.com  |                                  |  |   |     |                      |
| <b>Projet :</b>   |  | <b>WCT 1667 mc/h</b>   |                     | <b>Demande du :</b> 15/12/17   |                                  |  |   |     |                      |
| Caracteristiques Techniques   | Tirage modele  | Induit   |                     |  | modele                           |   |   |     |                      |
|   | Flux modele  | Contre-courant   |                     |  | modele                           |  |   |     |                      |
|   | Pression d'alimentation:   | 0,2  |                     |  | BAR                              |  |   |     |                      |
|   | Nombre de modules  | 2  |                     |  | UNIT                             |  |   |     |                      |
|   | <b>Débit d'eau</b>   | <b>833,5</b>   | m <sup>3</sup> /h   | 231,5  | lt/sec                           |  | 3669,8  | GPM | Water design speed 2 |
|   | <b>Débit d'eau total:</b>  | <b>1667</b>  | m <sup>3</sup> /h   | 463,1  | lt/sec                           |  | 7339,6  | GPM | m/s                  |
|   | Charge hydraulique :   | 16,1   |                     |  | m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h |  |   |     |                      |
|   | Température eau chaude:  | 60   | °C                  | 140  | °F                               |  |   |     |                      |
|   | Température eau réfrigérée:  | 30   | °C                  | 86   | °F                               |  |   |     |                      |
|   | Température bulbe humide:  | 25   | °C                  | 77   | °F                               |  |   |     |                      |
|   | Puissance thermique unitaire:  | 25005000   | Kcal/h              | 29,076   | kW                               |  |   |     |                      |
|   | Puissance thermique totale:  | 50010000   | Kcal/h              | 58,151   | MW                               |  |   |     |                      |
|   | Niveau de puissance (PWL) / pression sonore (PSL)*:  | -  | dB                  | < 85   | dB (A) @ mt                      |  | 1   |     |                      |
|   | *Pour atteindre le but acoustique indiqué pour la puissance acoustique PWL (ISO 3746-3744) on peut considérer la somme du volume et des sources de la tour; alors on assurera le niveau de pression acoustique moyen (qui est la somme logarithmique des niveaux à n. positions de mesure sur plusieurs hauteurs) égale à la valeur de la pression acoustique indiquée à 1 m. de l'enveloppe de la source complète de référence, donc le long du périmètre et en couverture (dehors flux). |  |                     |  |                                  |  |   |     |                      |
|   | PARAMÈTRES DE L'EAU  | Pertes par Évaporation :   | 4,611               | %  | 76,87                            |  | mc/h  |     |                      |
| Pertes par Entraînement :   |  | 0,002  | %                   | 0,0333   | mc/h                             |  |   |     |                      |
| Cycles de concentration :   |  | 3  | unit                | (valeur des cycles de concentration, fixée conformément aux caractéristiques de l'eau de processus et au type de traitement de l'eau adopté, ici nous insérons la valeur 3 comme souvent utilisée) |                                  |  |   |     |                      |
| Quantité d'eau à purger :   |  | 38,432685  | mc/h                | Consommation totale d'eau (réintégration) :  | 115,33                           | mc/h   |   |     |                      |
| Consommation de biocide:  |  | 12737  | grammes/semaine     | Consommation anti-incrustant   | 4419                             | grammes/h  |   |     |                      |
| NOTES: L'évaluation de la consommation de biocide et anti-incrustant est à titre purement indicatif. Hypothèse: on a considéré les dosages de produits purs a) un biocide oxydant pour un fonctionnement en continu de la tour pendant l'année avec un dosage à choc moyen de trois fois par semaine, en considérant le volume du circuit en tant que volume du bassin std augmenté de +30%; b) un anti-incrustant pour eau de réapprovisionnement traitée (TH 8°F) à 2 ou 3 CoC. |  |  |                     |  |                                  |  |   |     |                      |
| Execution   | Nombre de modules  | 2  |                     |  | UNIT                             |  |   |     |                      |
|   | Transmission:  | Indirect: arbre de transmission + adaptateur   |                     |  | modele                           |  |   |     |                      |
|   | Raport de reduction de vitesse / Vitesse de rot. De l' Arbre lent :  | 1 to 8   |                     |  | 180                              |  | Rpm   |     |                      |
|   | Matériau de l' arbre de trasmission / DBSE   | FIBRES DE CARBONE + SS316  |                     |  | 3017,3                           |  | mm  |     |                      |
|   | Nombre de cellules par module  | 1  |                     |  | UNIT                             |  |   |     |                      |
| Dimensions par cellule (l x b)  | 720  |  | 720                 |  | cm                               |  |   |     |                      |
| Dimensions module (l x b)   | 720  |  | 720                 |  | cm                               |  |   |     |                      |
| Type de filling   | FILM Y20   |  |                     |  |                                  |  |   |     |                      |
| Materials   | <b>COMPONENTS</b>  | <b>TAT</b>   | <b>TAS/TASF/TFP</b> | <b>TAZ/TAX</b>   | <b>FEC</b>                       | <b>TAR</b>   | <b>TAC</b>  |     |                      |
|   | Structure :  | SCAMBOND/STD   | HDGS                | SS304  | HDGS                             | FRP  | CONCRETE/CEMENTO**  |     |                      |
|   | Parois :   | SCAMBOND/STD   | SANDWICH FRP        | SANDWICH FRP   | FRP                              | FRP  | CONCRETE/CEMENTO**  |     |                      |
|   | Conduit de ventilation :   | SCAMBOND/STD   | SCAMBOND/HYB - HDGS | SS304  | HDGS                             | FRP  | CONCRETE/CEMENTO**  |     |                      |
|   | Silencieux circulaires à éjection :  | -  | -                   | -  | -                                | -  | -   |     |                      |
|   | Distribution :   | SCAMBOND/STD + PP  | HDGS+PP             | SS304+PP   | HDGS+PP+PVC                      | FRP+PVC+PP   | CONCRETE**+PVC+PP   |     |                      |
|   | Bac :  | -  | -                   | -  | -                                | -  | CONCRETE/CEMENTO**  |     |                      |
|   | Louvers:   | -  | -                   | -  | -                                | FRP  | CONCRETE/CEMENTO**  |     |                      |
|   | Silencieux et à l' aspiration :  | -  | -                   | -  | -                                | -  | -   |     |                      |
|   | Bolts:   | SS304  | SS304               | SS304  | SS304                            | SS304  | SS304   |     |                      |
| Filling et Separateur d'eau :   | PVC  | PVC  | PVC                 | PVC  | PP                               | PVC  |   |     |                      |
| Gicleurs ECO:   | PP   | PP   | PP                  | PP   | PP                               | PP   |   |     |                      |
| **Fourniture du ciment tours TAC exclue, dessins civiles inclus   |  |  |                     |  |                                  |  |   |     |                      |
| Rotor   | Type / Model :   | AXIAL  |                     | 4.3A-5486-07-HD-TD   |                                  |  |  |     |                      |
|   | Quantité d' air / Press. Statique :  | 200,21   | m <sup>3</sup> /sec | 21,08  | mm H <sub>2</sub> O              |  |   |     |                      |
|   | Diameter (mm) / Tip Speed (m/sec) :  | 5486   |                     | 51,7   |                                  |  |   |     |                      |
|   | Nombre & Blade Materials:  | 3 Blades   |                     |  | Al 6060 T5                       |  |   |     |                      |
| Hub material:   | ALUMINUM   |  |                     |  |                                  |  |   |     |                      |
| Moteur électrique   | Type :   | TEFC Asynchronous 3-phase with special hi quality bearings SKF type 2RSC3 lubricated for life totally watertight |                     |  |                                  |  |  |     |                      |
|   | Dimension de Moteur / Facteur de service :   | 280 M4   |                     | 1,1  |                                  |  |   |     |                      |
|   | Nombre de poles :  | 4  |                     |  |                                  |  |   |     |                      |
|   | Puissance installée unitaire :   | 75   |                     | kW   |                                  |  |   |     |                      |
|   | Puissance installée modules:   | 75   |                     | kW   |                                  |  |   |     |                      |
|   | Puissance installée totale :   | 150  |                     | kW   |                                  |  |   |     |                      |
|   | Puissance absorbée unitaire:   | 67,5   |                     | kW   |                                  |  |   |     |                      |
|   | Puissance absorbée modules:  | 67,5   |                     | kW   |                                  |  |   |     |                      |
|   | Puissance absorbée totale :  | 135  |                     | kW   |                                  |  |   |     |                      |
|   | Vitesse:   | 1440   |                     | Rpm  |                                  |  |   |     |                      |
| Tension / Frequence :   | 400 / 50   |  | Volts / Hz          |  |                                  |  |   |     |                      |
| Class d'isolation:  | IP55   |  |                     |  |                                  | modele   |   |     |                      |
| Type de protection:   | F/B  |  |                     |  |                                  | modele   |   |     |                      |
| (*)   | Nota :   |  |                     |  |                                  |  |   |     |                      |
| OVERALL DRAWINGS  |  |  |                     | n°   | 1946-scsm-16-                    |  |   |     |                      |
|   |  |  |                     | n°   | L12_MOD                          |  |   |     |                      |

## Annexe 2

✓ Linéarisation autour d'un point de fonctionnement ou d'équilibre :

Soit une fonction  $y = f(x, z)$  non linéaire, définie autour du point d'équilibre par  
 $y_e = f(x_e, z_e)$

On a la série de Taylor :

$$y = f(x_e, z_e) + \left[ \frac{\partial f(x, z)}{\partial x} \right]_{x_e, z_e} (x - x_e) + \left[ \frac{\partial f(x, z)}{\partial z} \right]_{x_e, z_e} (z - z_e) + \dots$$

Tronquée après les termes du premier ordre;

$$\begin{cases} \delta y = y - y_e \\ \delta x = x - x_e \\ \delta z = z - z_e \end{cases}$$

La loi linéarisée est alors définie par :

$$\delta y = \left[ \frac{\partial f(x, z)}{\partial x} \right]_{x_e, z_e} \delta x + \left[ \frac{\partial f(x, z)}{\partial z} \right]_{x_e, z_e} \delta z$$

1) Le modèle linéaire de la turbine hydraulique dans le chapitre 3 est obtenu selon cette méthode, voici dessous, le développement des équations :

A partir du modèle non linéaire suivant (3.35) :

$$\begin{cases} \frac{dq}{dt} = \frac{1}{T_w} \left( 1 - \frac{q^2}{A_t^2 g^2} \right) \\ P_m = \frac{q^3}{A_t^2 g^2} \end{cases}$$

Selon le développement de Taylor;

On aura les deux fonctions:

$$\begin{cases} \frac{dq}{dt} = f_1(q, g) \\ P_M = f_2(q, g) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{dq}{dt} = f_1(q_0, g_0) + \left[ \frac{\partial f_1(q, g)}{\partial q} \right]_{q_0, g_0} (q - q_0) + \left[ \frac{\partial f_1(q, g)}{\partial g} \right]_{q_0, g_0} (g - g_0) \\ P_M = f_2(q_0, g_0) + \left[ \frac{\partial f_2(q, g)}{\partial q} \right]_{q_0, g_0} (q - q_0) + \left[ \frac{\partial f_2(q, g)}{\partial g} \right]_{q_0, g_0} (g - g_0) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{dq}{dt} = 0 - \frac{2q_0}{T_w A_t^2 g_0^2} (q - q_0) + \frac{2q_0^2}{T_w A_t^2 g_0^3} (g - g_0) \\ P_M = \frac{q_0^3}{A_t^2 g_0^2} + \frac{3q_0^2}{A_t^2 g_0^2} (q - q_0) + \frac{2q_0^2}{T_w A_t^2 g_0^3} (g - g_0) \end{cases}$$

(En régime stationnaire  $(q_0, g_0)$ , la fonction  $\frac{dq}{dt}$  est nulle), on obtient enfin :

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{dq}{dt} = -\frac{2q_0}{T_w A_t^2 g_0^2} (q - q_0) + \frac{2q_0^2}{T_w A_t^2 g_0^3} (g - g_0) \\ P_M = P_0 + \frac{3q_0^2}{A_t^2 g_0^2} (q - q_0) + \frac{2q_0^2}{T_w A_t^2 g_0^3} (g - g_0) \end{cases} \quad \text{Avec } P_0 = \frac{q_0^3}{A_t^2 g_0^2}$$

2) Obtention du système linéarisé du modèle DQ du convertisseur statique (chapitre 3) :

Soit, en général, un système non linéaire défini par les fonctions d'état et de sortie suivantes :

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = f_1(X_1(t), \dots, X_1(t), U_1(t), \dots, U_m(t)) \\ \vdots \\ \dot{X}_n = f_n(X_1(t), \dots, X_1(t), U_1(t), \dots, U_m(t)) \\ Y_1 = g_1(X_1(t), \dots, X_1(t), U_1(t), \dots, U_m(t)) \\ \vdots \\ Y_p = g_p(X_1(t), \dots, X_1(t), U_1(t), \dots, U_m(t)) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{X}(t) = f(X(t), U(t)) \\ Y(t) = g(X(t), U(t)) \end{cases}$$

La linéarisation du modèle d'état autour du point d'équilibre  $(X_0, U_0)$  est développée selon Taylor au 1<sup>er</sup> ordre des fonctions  $f$  et  $g$  :

- Équations d'état

$$\begin{cases} \dot{X}_1 \approx f_1(X_0, U_0) + \frac{\partial f_1}{\partial X_1} \Big|_{X_0, U_0} (X_1 - X_0) + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial X_n} \Big|_{X_0, U_0} (X_n - X_0) + \frac{\partial f_1}{\partial U_1} \Big|_{X_0, U_0} (U_1 - U_0) + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial U_m} \Big|_{X_0, U_0} (U_m - U_0) \\ \vdots \\ \dot{X}_n \approx f_n(X_0, U_0) + \frac{\partial f_n}{\partial X_1} \Big|_{X_0, U_0} (X_1 - X_0) + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial X_n} \Big|_{X_0, U_0} (X_n - X_0) + \frac{\partial f_n}{\partial U_1} \Big|_{X_0, U_0} (U_1 - U_0) + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial U_m} \Big|_{X_0, U_0} (U_m - U_0) \end{cases}$$

- Équations de sortie

$$\begin{cases} Y_1 \approx g_1(X_0, U_0) + \frac{\partial g_1}{\partial X_1} \Big|_{X_0, U_0} (X_1 - X_0) + \dots + \frac{\partial g_1}{\partial X_n} \Big|_{X_0, U_0} (X_n - X_0) + \frac{\partial g_1}{\partial U_1} \Big|_{X_0, U_0} (U_1 - U_0) + \dots + \frac{\partial g_1}{\partial U_m} \Big|_{X_0, U_0} (U_m - U_0) \\ \vdots \\ Y_p \approx g_p(X_0, U_0) + \frac{\partial g_p}{\partial X_1} \Big|_{X_0, U_0} (X_1 - X_0) + \dots + \frac{\partial g_p}{\partial X_n} \Big|_{X_0, U_0} (X_n - X_0) + \frac{\partial g_p}{\partial U_1} \Big|_{X_0, U_0} (U_1 - U_0) + \dots + \frac{\partial g_p}{\partial U_m} \Big|_{X_0, U_0} (U_m - U_0) \end{cases}$$

En utilisant les relations suivantes :

$$\begin{cases} \delta X = X - X_0 \\ \delta U = U - U_0 \\ \delta Y = Y - Y_0 \end{cases}$$

Les équations peuvent alors s'écrire :

- Équations d'états

$$\begin{cases} \delta \dot{X}_1 \approx f_1(X_0, U_0) + \frac{\partial f_1}{\partial X_1} \Big|_{X_0, U_0} \delta X_1 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial X_n} \Big|_{X_0, U_0} \delta X_n + \frac{\partial f_1}{\partial U_1} \Big|_{X_0, U_0} \delta U_1 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial U_m} \Big|_{X_0, U_0} \delta U_m \\ \vdots \\ \delta \dot{X}_n \approx f_n(X_0, U_0) + \frac{\partial f_n}{\partial X_1} \Big|_{X_0, U_0} \delta X_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial X_n} \Big|_{X_0, U_0} \delta X_n + \frac{\partial f_n}{\partial U_1} \Big|_{X_0, U_0} \delta U_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial U_m} \Big|_{X_0, U_0} \delta U_m \end{cases}$$

- Équations de sortie :

$$\begin{cases} \delta Y_1 \approx g_1(X_0, U_0) + \frac{\partial g_1}{\partial X_1} \Big|_{X_0, U_0} \delta X_1 + \dots + \frac{\partial g_1}{\partial X_n} \Big|_{X_0, U_0} \delta X_n + \frac{\partial g_1}{\partial U_1} \Big|_{X_0, U_0} \delta U_1 + \dots + \frac{\partial g_1}{\partial U_m} \Big|_{X_0, U_0} \delta U_m \\ \vdots \\ \delta Y_p \approx g_p(X_0, U_0) + \frac{\partial g_p}{\partial X_1} \Big|_{X_0, U_0} \delta X_1 + \dots + \frac{\partial g_p}{\partial X_n} \Big|_{X_0, U_0} \delta X_n + \frac{\partial g_p}{\partial U_1} \Big|_{X_0, U_0} \delta U_1 + \dots + \frac{\partial g_p}{\partial U_m} \Big|_{X_0, U_0} \delta U_m \end{cases}$$

La forme matricielle est :

$$\begin{cases} \delta \dot{X}(t) = A(X_0, U_0) \delta X + B(X_0, U_0) \delta U \\ \delta Y(t) = C(X_0, U_0) \delta X + D(X_0, U_0) \delta U \end{cases}$$

Avec :

$$A(X_0, U_0) = \frac{\partial f}{\partial X^T} \Big|_{X_0, U_0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial X_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial X_n} \end{bmatrix}_{X_0, U_0} ; B(X_0, U_0) = \frac{\partial f}{\partial U^T} \Big|_{X_0, U_0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial U_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial U_m} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial U_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial U_m} \end{bmatrix}_{X_0, U_0}$$

$$C(X_0, U_0) = \frac{\partial g}{\partial X^T} \Big|_{X_0, U_0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial X_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_p}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial g_p}{\partial X_n} \end{bmatrix}_{X_0, U_0} ; D(X_0, U_0) = \frac{\partial g}{\partial U^T} \Big|_{X_0, U_0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial U_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial U_m} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_p}{\partial U_1} & \dots & \frac{\partial g_p}{\partial U_m} \end{bmatrix}_{X_0, U_0}$$

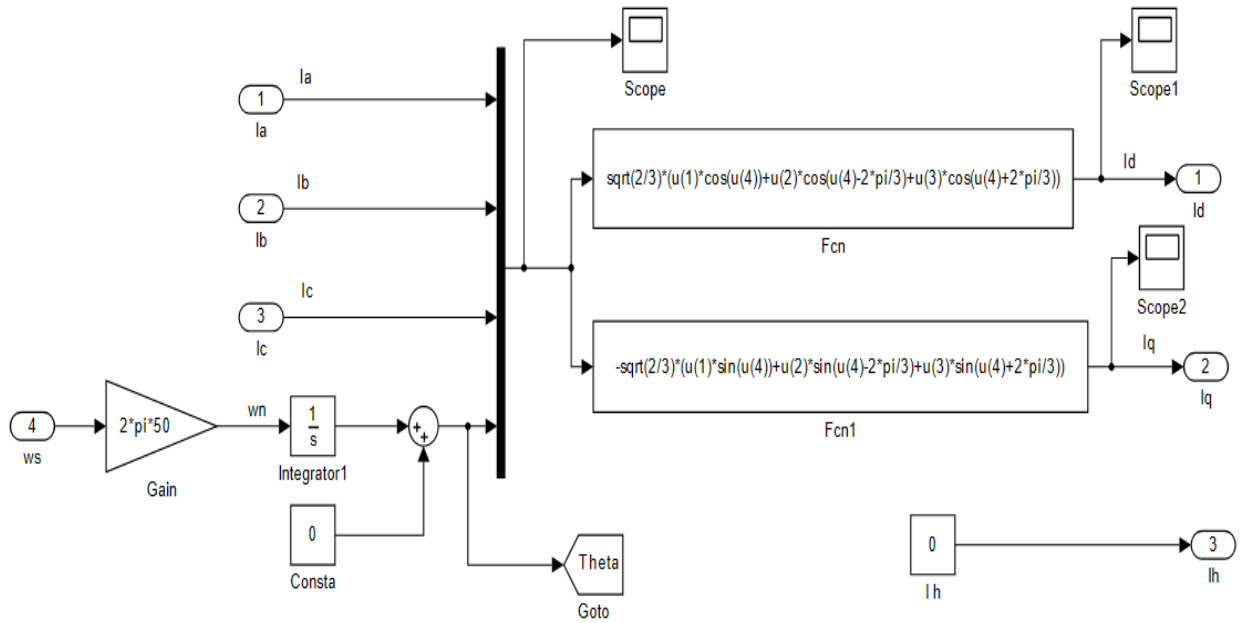
### Annexe 3 :

Conversion des grandeurs en (pu)

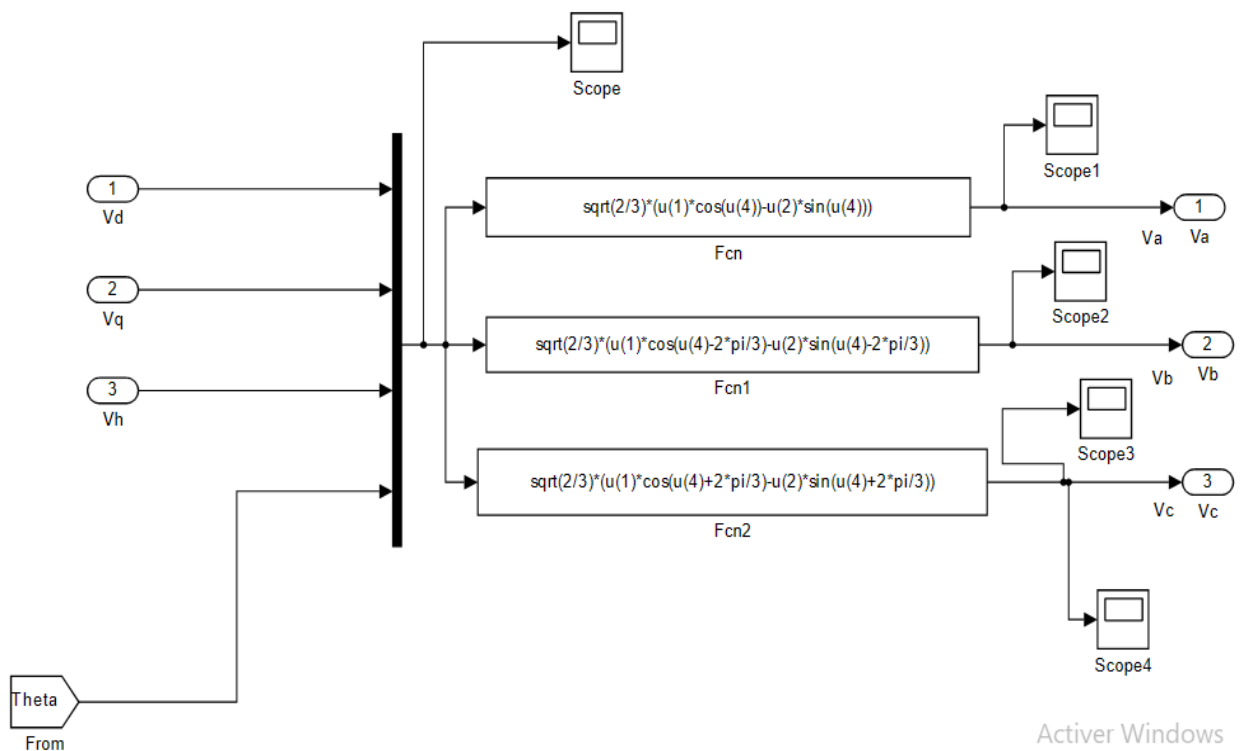
Valeur de la grandeur en 
$$pu = \frac{\text{valeur de la grandeur actuelle}}{\text{valeur de la base de la grandeur}}$$

|            | Stator  | Circuit de champ  | Unité |
|------------|---|---|-------|
| Tension    | $U_{s \text{ ref}} = \sqrt{2}U_N$   | $U_{f \text{ ref}} = \frac{S_{s \text{ ref}}}{I_{f \text{ ref}}}$   | [V]   |
| Courant    | $I_{s \text{ ref}} = \sqrt{2}I_N$   | $I_{f \text{ ref}}$   | [A]   |
| Puissance  | $S_{f \text{ ref}} = \frac{3}{2}U_{ref}I_{ref} = 3U_N I_N$  |   | [VA]  |
| Impédance  | $Z_{s \text{ ref}} = \frac{U_{s \text{ ref}}}{I_{f \text{ ref}}}$                                     | $Z_{f \text{ ref}} = \frac{U_{f \text{ ref}}}{I_{f \text{ ref}}} = \frac{S_{s \text{ ref}}}{I_{f \text{ ref}}^2}$ | [Ω]   |
| Inductance | $L_{s \text{ ref}} = \frac{Z_{s \text{ ref}}}{\omega_{ref}}$  | $L_{f \text{ ref}} = \frac{Z_{f \text{ ref}}}{\omega_{ref}}$  | [H]   |
| Flux       | $\Psi_{s \text{ ref}} = L_{s \text{ ref}} I_{s \text{ ref}} = \frac{U_{s \text{ ref}}}{\omega_{ref}}$ |   | [WB]  |

## Annexe 4 : Bloc transformée de park.

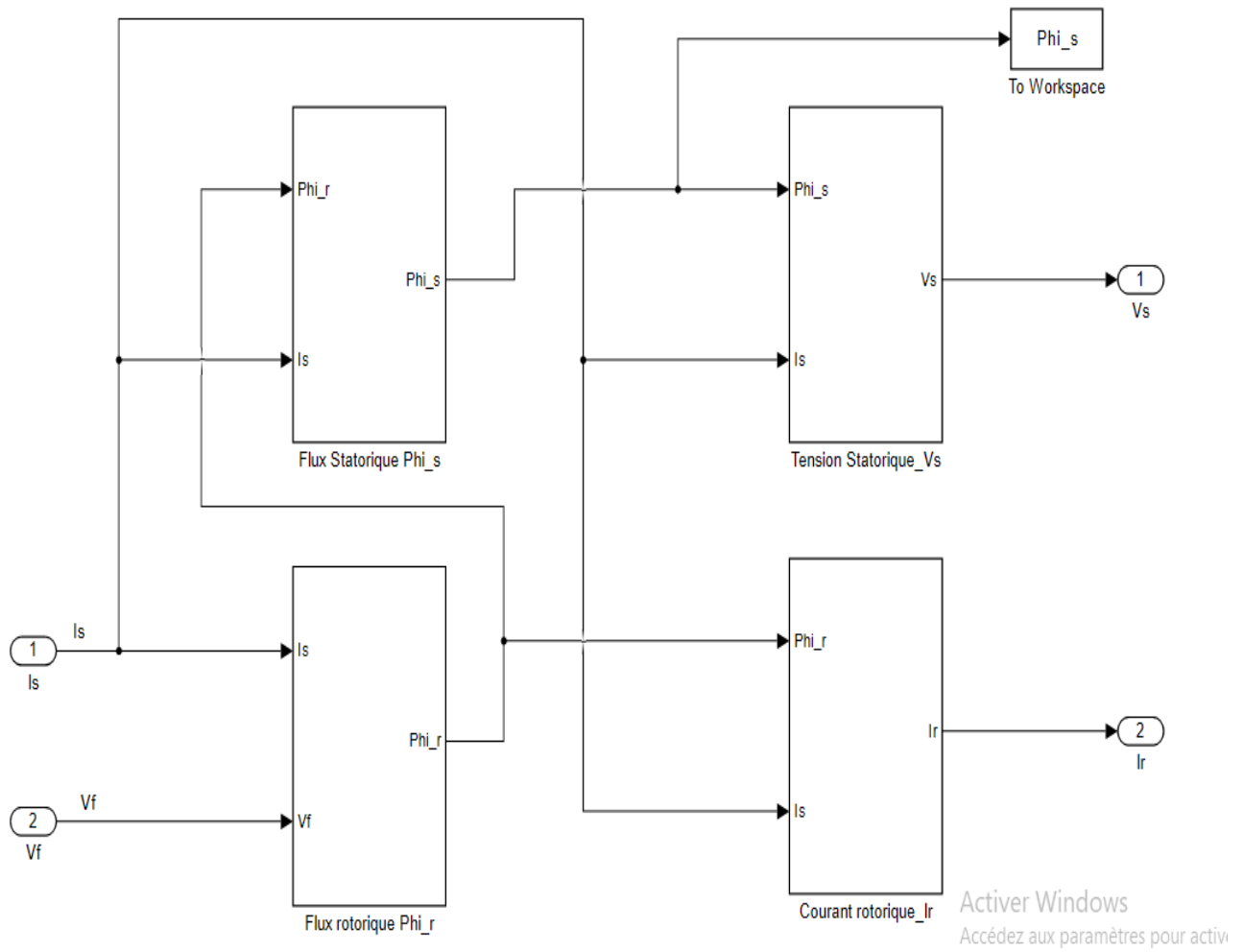


## Annexe 5 : Bloc transformée de Park inverse.

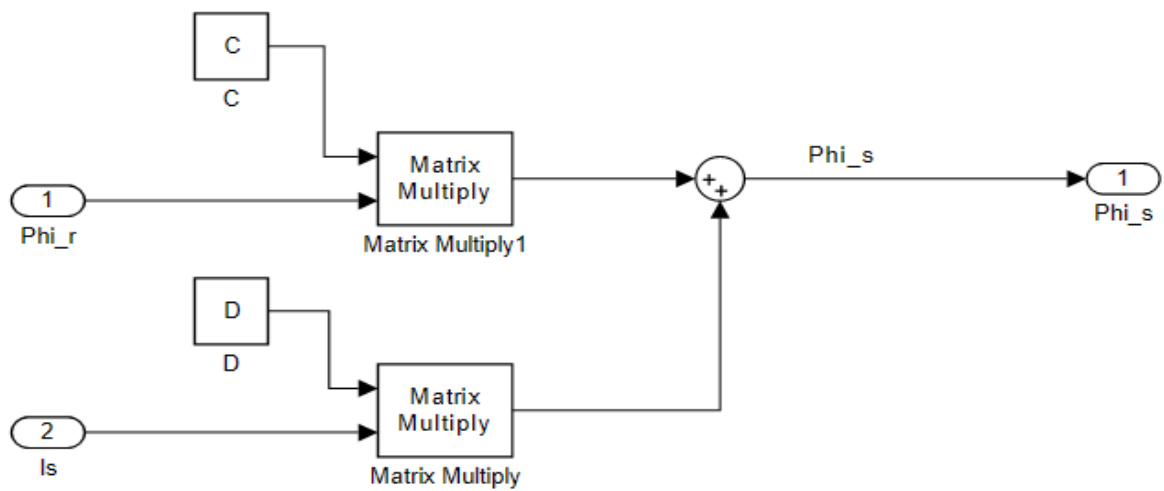


Activer Windows

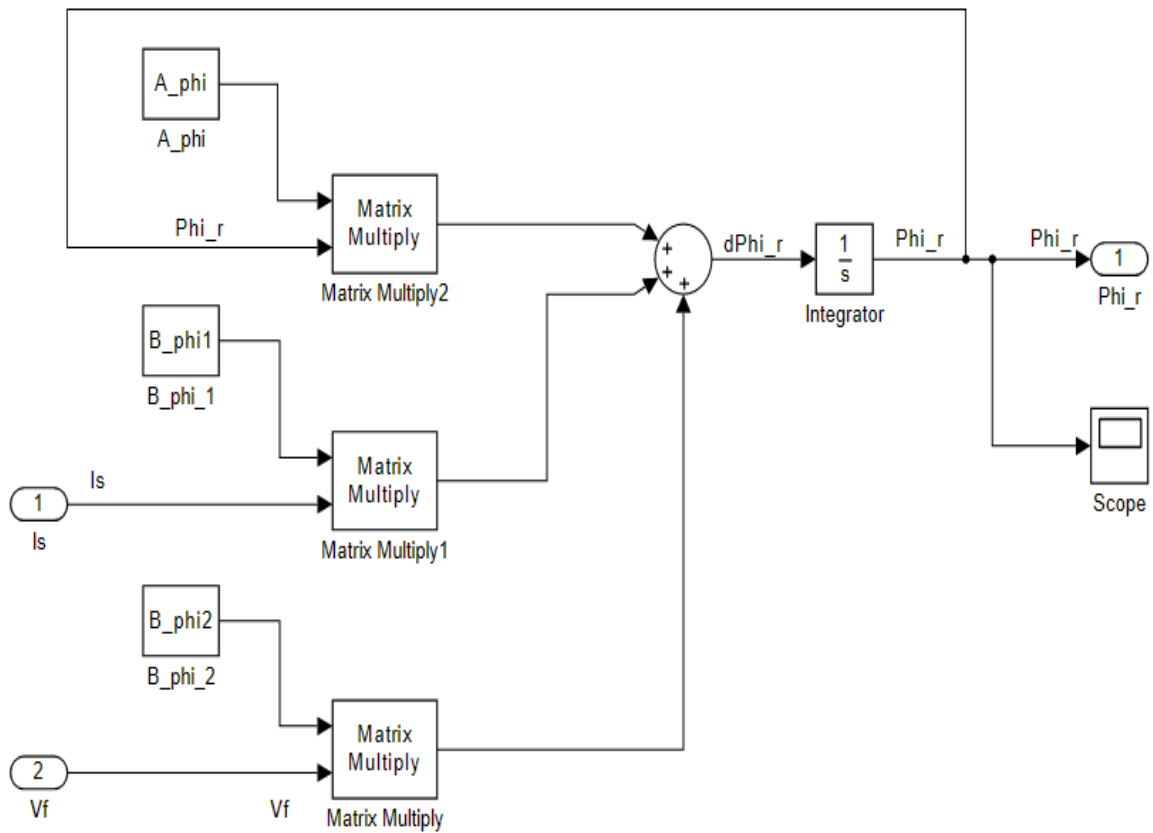
**Annexe 6 :** Dessin simulink du modèle hybride de la machine synchrone.



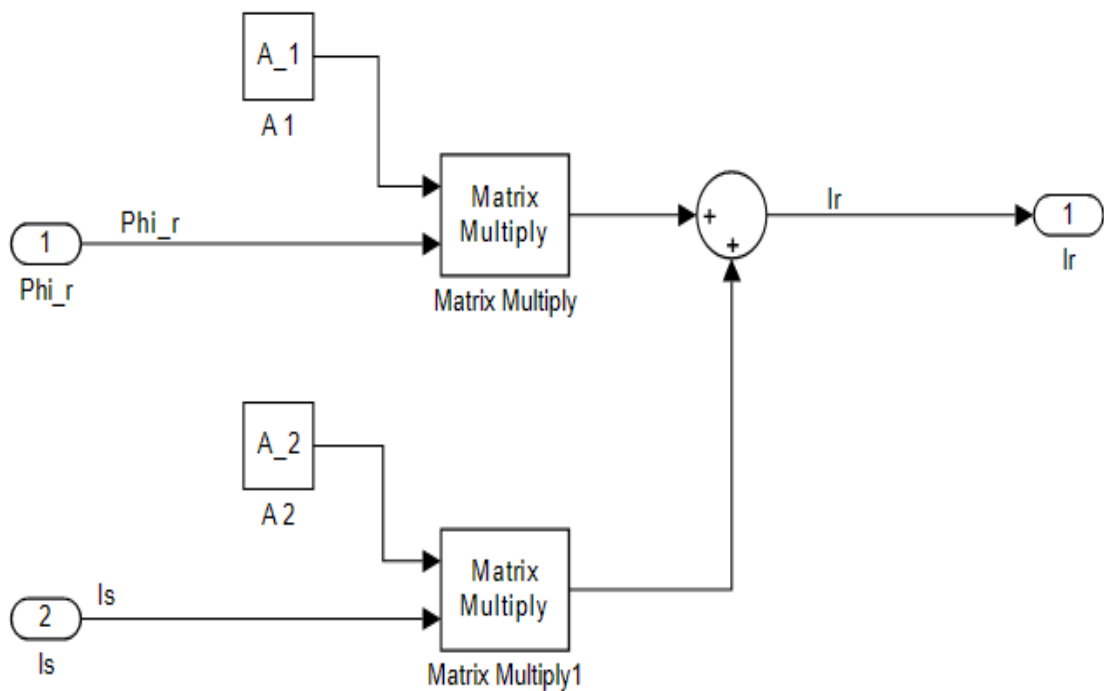
**Annexe 7 :** Calcul du flux statorique  $\Phi_s$ .



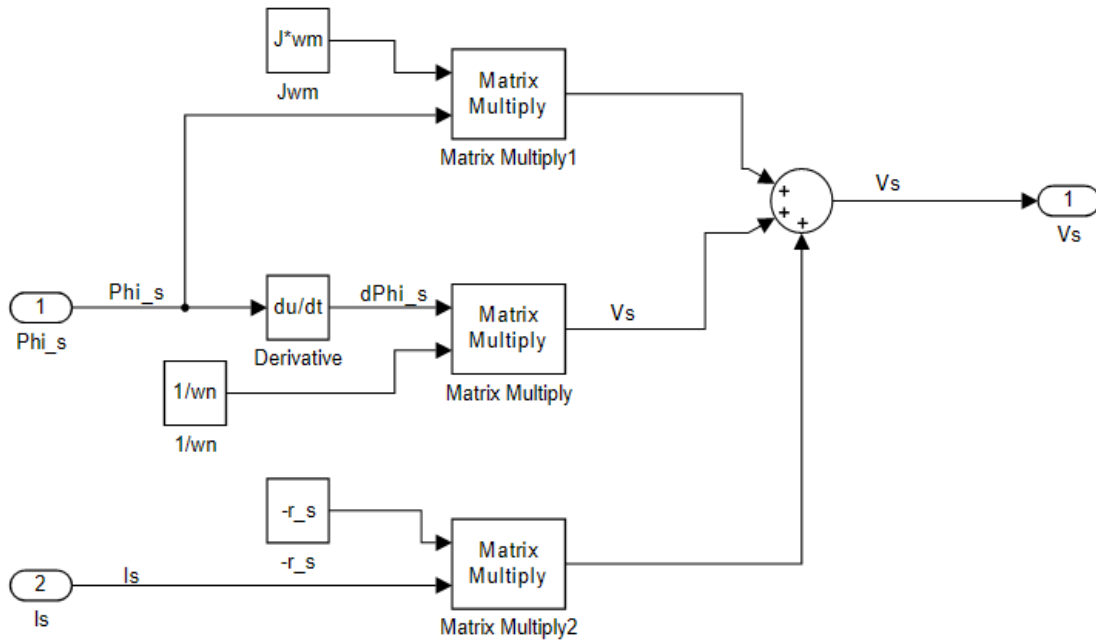
**Annexe 8 :** Calcul du flux rotorique  $\Phi_r$ .



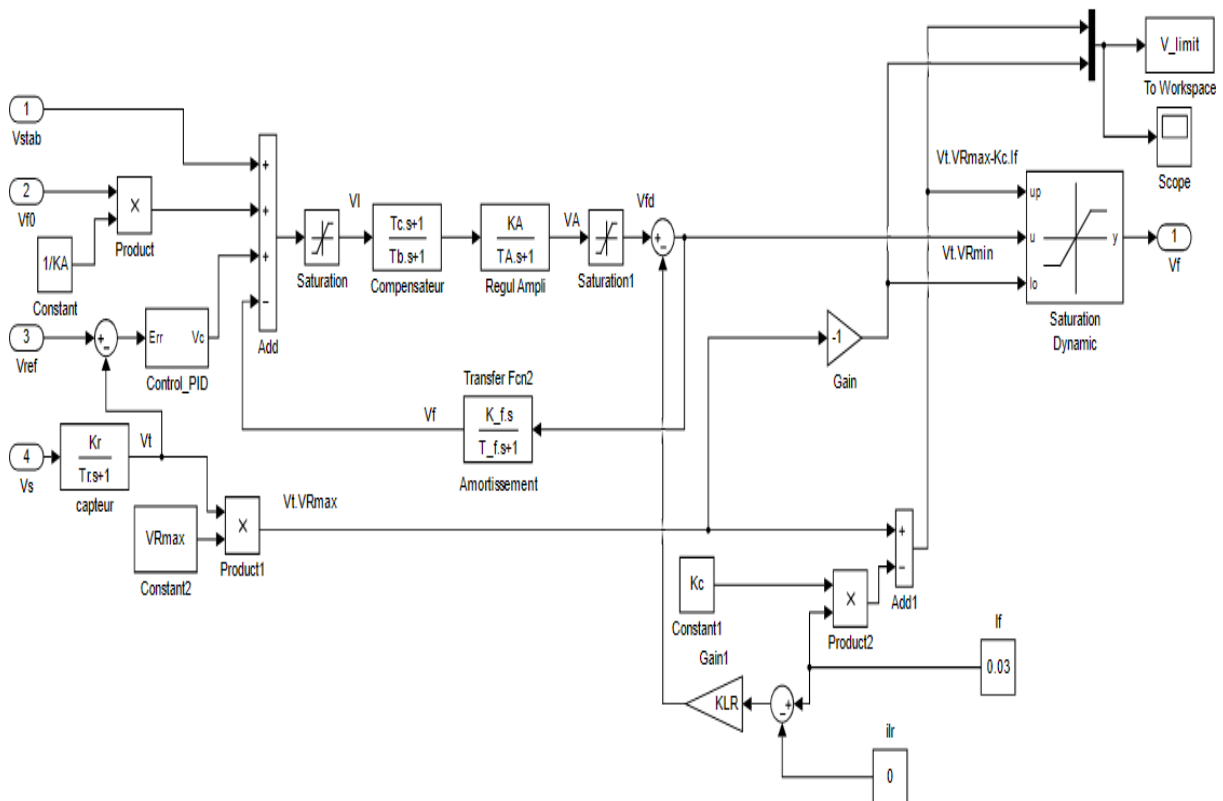
**Annexe 9 :** Calcul du courant rotorique  $I_r$ .



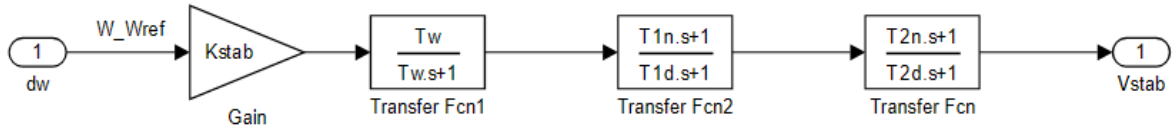
## Annexe 10 : Calcul de la tension statorique $V_s$ .



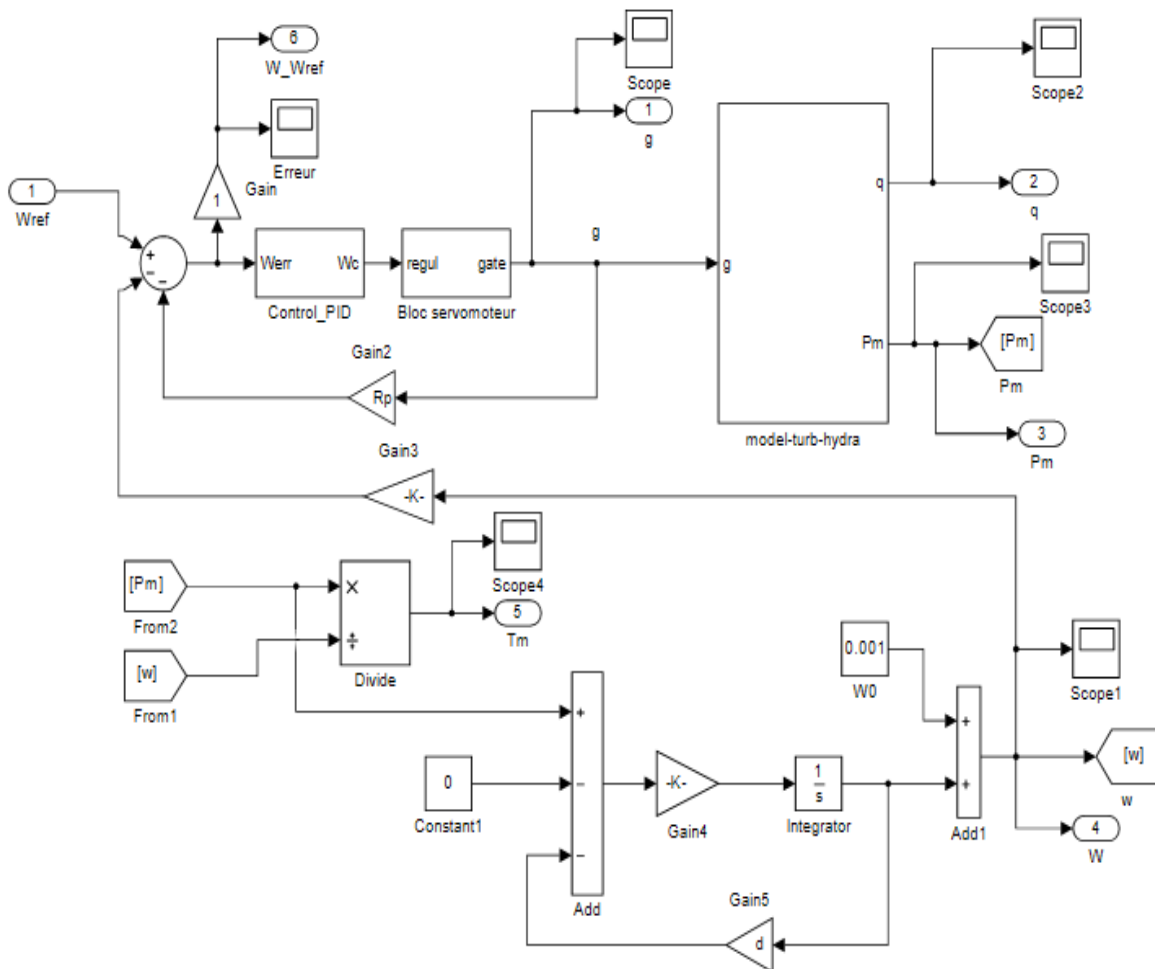
## Annexe 11 : Dessin simulink du système d'excitation type STI- Régulateur de tension.



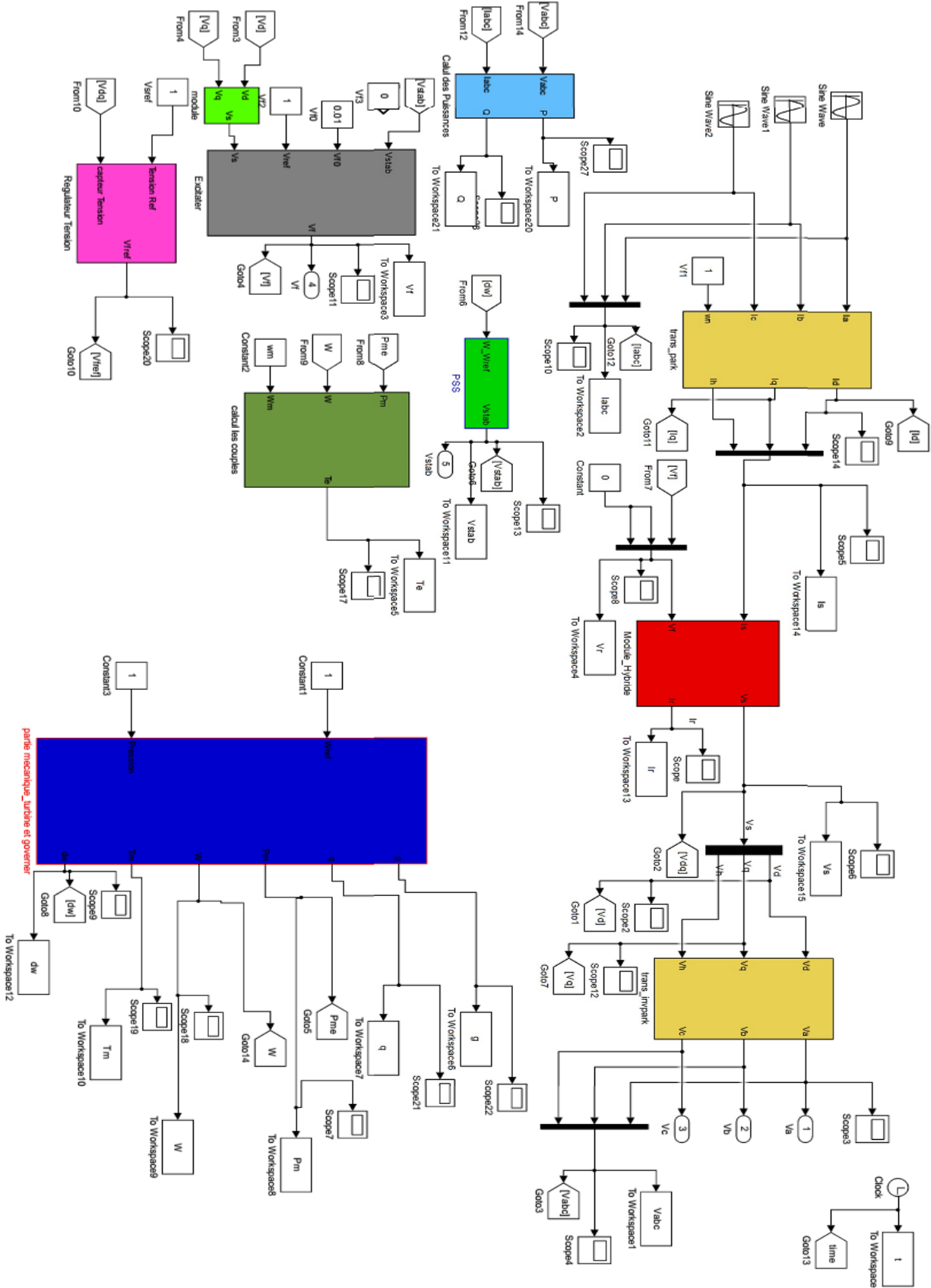
**Annexe 12 :** Dessin simulink du Stabilisateur de puissance PSSIA.



**Annexe 13 :** Dessin simulink du régulateur de vitesse de la turbine hydraulique.



## Annexe 14 : Dessin simulink du modèle global du groupe turbine-alternateur.



## Annexe 15 : Scripte matlab.m du programme global.

```
% initialisation de l ' espace de travail
%=====
clear all; close all
clc
% Données-----
% Caractéristiques de base de la machine
S_base = 250;           % puissance de base (KVA)
V_base = 400*sqrt(2);  % tension de base (V)
I_base = 360*sqrt(2);  % courant de base (A)
Z_base = V_base/I_base; % impédance de base (Ohms )
f = 50;                % fréquence de base (hertz)
wn = 2*pi*f;          % pulsation électrique de base
p = 3;                 % Nombre de paires de pôle
N = 60*f/p;           % vitesse de rotation
wm = 1;               % vitesse de synchronisme
% Paramètres de la machine (en pu )
ra = 0.0198;          % résistance stratorique
rD = 0.012;           % résistance de l'amortisseur D
rQ = 0.0073;          % résistance de l'amortisseur Q
rh = 1;               % résistance homopolaire
rf = 0.1983;          % résistance de fuite
xa = 0.0101;          % réactance stratorique
xD = 0.669;           % réactance de l'amortisseur D
xQ = 0.1352;          % réactance de l'amortisseur Q
xh = 1;               % réactance homopolaire
xd = 0.35;            % réactance mutuelle à l'axe d
xq = 0.3417;          % réactance mutuelle à l'axe q
%%
%
% <<FILENAME.PNG>>
%
% <<FILENAME.PNG>>
%
%
xkf1 = -0.0081;       % réactance de kany
xf = 0.0295;          % réactance de fuite
% réactance stratorique axe d
xmd = xd-xa;
% réactance stratorique axe q
xmq = xq-xa;
% réactances mutuelles
xfd = xmd;
xDd = xfd;
xqQ = xmq;
xfd = xkf1+xmd;
xff = xmd + xkf1 + xf;
xDD = xmd + xkf1 + xD;
xQQ = xmq + xQ;
xDf = xfd;
% Matrice des résistances du stator
r_s = diag([ra ra rh]);
% Matrice des résistances du rotor
r_r = diag([rf rD rQ]);
% Matrice globale des résistances du stator et rotor
R = blkdiag(-r_s,r_r);
```

```

% Matrice des réactances du stator
Xss = diag([xd xq xh]);
% Matrice des réactances mutuelles entre le stator et le rotor
Xsr = [xfd xDd 0;0 0 xqQ;0 0 0];
% Matrice des réactances du rotor
Xrr = [xff xfD 0;xDf xDD 0;0 0 xQQ];
% Matrice globale des réactances
X = [-Xss Xsr;-Xsr' Xrr];

% calcul des matrices du modèle
% Flux rotorique
A_phi = -wn*r_r*inv(Xrr);
B_phil = -wn*r_r*inv(Xrr)*Xsr';
B_phi2 = wn*eye(3);

% Flux statorique
C = Xsr*inv(Xrr);
D = Xsr*inv(Xrr)*Xsr'-Xss;

% tension statorique
J = [0 -1 0; 1 0 0; 0 0 0];

%courant au rotor
A_1 = inv(Xrr);
A_2 = inv(Xrr)*Xsr';

%----- Partie Mécanique -----
% Paramètres reliés à la turbine et gouverneur:
At = 1.8; % gain de la turbine
Tw = 0.1; % temps de démarrage de l'eau
beta = 0.001; % est e de la turbine
Ka = 30; % cste gain statique du servomoteur
Ta = 0.1; % cste de temps du servomoteur
gmin = 0.01; % ouverture minimale du vannage
gmax = 10; % ouverture maximale du vannage
Vgmin = 0.01; % vitesse d'ouverture minimale
Vgmax = 10; % vitesse d'ouverture maximale
Rp = 0.8; % 0.02 statisme
g0 = 0.02; % vannage initial
G0 = At*g0;
H = 0.05; % constant d'inertie
d = 1;

% Régulation de la vitesse
Wref = 1; % vitesse de référence
Pref = 0.6; % puissance de référence
Pe = -0.35; % puissance électrique
Pm = 215; % puissance nominale en KW
dref = 1; % mode de fonctionnement du régulateur
w0 = 0.1;

% paramètres des régulateur :
% calcul des params PID
tau_c = 0.01;

```

```

Kp_w = 1/(tau_c*Rp*Ka);
Ki_w = Ka;
Kd_w = Ta;
% Gain du retour d'état
K_c = (1/At)*(1-(Tw*G0/2));

%-----Partie Excitation-----
%paramètres de l'excitatrice:

% Référence article "Excitation sys param setting for power system planing"[2].

% Données paramètres de l'excitatrice ST1
fe = 50;           % fréquence
Te = 1/fe;        % période
Te_pu = Te*2*pi;

% params transformateur de stabilisation (pu)
Rt = 0.0159;       % resistance
Ll = 0.6e-2;      % leakage inductance
M = 0.8e-3;       % mutual inductance

% angle d'amorçage des thyristors
alpha = pi/6;

% tensions de commande :
Vs_rms = 400;
V_base = Vs_rms*sqrt(2);
Vab = sqrt(3)*Vs_rms;
Vab_pu = Vab/V_base;
VAmax = 500;
VAmin = -VAmax;
Vl_max = 4.4;
Vl_min = -Vl_max;
VRmax = 6.4;
VRmin = -VRmax;
Vfmax = 11.5;
Vfmin = -Vfmax;

% facteur de rectification .
Kc = 0.04;
KLR = 1;
Vref = 1;

% Gains et este de temps;
Tc = 1;
Tb = 1;
Kexc = 1;
Texc = 0;

% Facteur de transformation
Ke = 12;           % Ratio excitation/transfo
Ktb = 10;         % Ratio transfo/GS

```

```

% Amplification
KA = 300;
TA = 0.001;
K_f = 0.001;
T_f = 0.1;

% FT Génératrice
xmd1 = 0.3399;
Rf = 0.1983;
xf = 0.0295;
Kg = xmd1/Rf;
Tg = xf/Rf;

% Capteur
Kr = 1;
Tr = 6e-3;

% Correcteur PID par compensation de pôles:
e = 0.9; %coefficient d amortissement
w_n = 1; % pulsation propre du système
Kp = ((TA+Tg)*Tr*w_n^2)/(Kr*KA*Kg);
Ki = 1/(TA+Tg);
Kd = (TA*Tg)/(TA+Tg);

% paramètres du Stabilisateur de puissance -----%
Kstab = 20;
T_w = 0.2;
T1n = 50e-3;
T1d = 20e-3;
T2n = 3;
T2d = 5.4;
Vsmax = 015;
Vsmin = -Vsmax;
%- ----- FIN ----- %

```