

HYDROTUR – HydroStab Solution Simulateur pour turbines hydrauliques

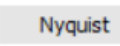
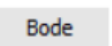
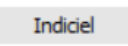
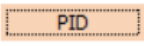
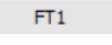
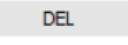
Études de stabilité Réglages préliminaires des asservissements pour turbines hydrauliques FRANCIS-KAPLAN-PELTON






Guide d'utilisation – Version 2.3




par Pierre Perrichon

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| BIBLIOGRAPHIE | 5 |
| SUPPORT TECHNIQUE - CONTACT | 5 |
| LISTE DES SYMBOLES | 6 |
| RESUME | 6 |
| AVANT-PROPOS | 7 |
| 1 INTRODUCTION | 7 |
| 1.1 Présentation..... | 7 |
| 1.2 Approche linéaire du réglage de stabilité d'un groupe hydro-électrique | 7 |
| 1.3 Terminologie..... | 9 |
| 2 FOURNITURE | 11 |
| 2.1 Installation de HydroStab..... | 11 |
| 2.2 Désinstallation de HydroStab..... | 12 |
| 3 CONSTRUCTION ET CHARGEMENT DE LA BOITE A OUTILS HYDROSTAB DANS SCILAB | 13 |
| 3.1 Avant-propos | 13 |
| 3.2 Prérequis..... | 13 |
| 3.3 Le constructeur builder.sce..... | 13 |
| 3.4 Le chargeur loader.sce | 14 |
| 3.4.1 Chargement..... | 14 |
| 3.4.2 Variable globale due au lancement de HydroStab | 14 |
| 3.4.3 Troubleshooting | 14 |
| 4 GUIDE D'UTILISATION | 14 |
| 4.1 Réduction des schémas hydrauliques - EXCEL CALTUR Solution..... | 14 |
| 4.1.1 Principe | 14 |
| 4.1.2 Éléments de calcul..... | 15 |
| 4.2 HydroStab Solution | 16 |
| 4.2.1 Principe de HydroStab..... | 16 |
| 4.2.2 Fenêtre d'accueil de Scilab..... | 16 |
| 4.2.3 Espace d'accueil | 17 |
| 4.2.3.1 Boutons    | 18 |
| 4.2.3.2 Bouton PID  | 19 |
| 4.2.3.3 Bouton FTx  | 19 |
| 4.2.3.4 Bouton DEL  | 20 |
| 4.2.3.5 Impression des légendes dans la console Scilab..... | 20 |
| 4.2.3.6 Outils graphiques disponibles..... | 21 |
| 4.3 Menus dédiés dans HydroStab | 21 |
| 4.3.1 Barre des menus | 21 |
| 4.3.2 Menu « Fichier » | 22 |
| 4.3.2.1 Créer une nouvelle configuration..... | 22 |
| 4.3.2.2 Sauvegarde d'une configuration..... | 22 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.3.2.3 | Rechargement d'une configuration | 24 |
| 4.3.2.4 | Fermeture d'une session HydroStab Solution « Fermer » ou  | 25 |
| 4.3.3 | Menu « Méthodes » | 25 |
| 4.3.4 | Menu ? | 26 |
| 4.3.4.1 | Menu Commentaire | 26 |
| 4.3.4.2 | Menu Symétrie Nyquist | 26 |
| 4.3.4.3 | Menu Nyquist -3dB | 27 |
| 4.3.4.4 | Menu « Aide en ligne » | 27 |
| 4.3.4.5 | Version de HydroStab | 28 |
| 4.3.4.6 | Version de Scilab | 28 |
| 5 | REPertoire des Modeles XCOS | 29 |
| 5.1 | Modèle réduit du procédé à régler | 29 |
| 5.2 | Modèle de commande du procédé en boucle ouverte FTBO  FTBO.zcos | 29 |
| 5.3 | Modèle de commande du procédé en boucle fermée FTBF  FTBF.zcos | 30 |
| 5.4 | Utilisation dans le programme HydroStab | 30 |
| 6 | ELEMENTS DE CALCUL POUR LA DETERMINATION DES PARAMETRES DE STABILITE DU REGULATEUR DE VITESSE ... | 30 |
| 6.1 | Introduction | 30 |
| 6.1.1 | Étude de stabilité du groupe | 31 |
| 6.2 | Étude en petits mouvements | 32 |
| 7 | METHODES D'OPTIMISATION | 33 |
| 7.1 | Méthode de la Marge de Module | 33 |
| 7.1.1 | Critère de stabilité dans le plan de Nyquist | 33 |
| 7.1.1.1 | Principe | 34 |
| 7.1.1.2 | Résultats à +3 dB | 35 |
| 7.1.2 | Réglage de la Marge de module à -3 dB | 36 |
| 7.1.2.1 | Principe | 36 |
| 7.1.2.2 | Résultats à -3 dB | 36 |
| 7.2 | Méthode de Ziegler-Nichols | 38 |
| 7.2.1 | Principe de la méthode | 38 |
| 7.2.2 | Mise en œuvre de la méthode | 38 |
| 7.2.2.1 | Sélection des modes Manuel ou Automatique pour la mise en œuvre | 38 |
| 7.2.2.2 | Activation en mode manuel | 38 |
| 7.2.2.3 | Initialisation et paramétrage | 39 |
| 7.2.2.4 | Réglage du gain critique  - Validation des calculs  | 39 |
| 7.2.2.5 | Calculs | 41 |
| 7.2.2.6 | Vérifications | 42 |
| 7.2.2.7 | Activation en mode Automatique | 44 |
| 7.2.2.8 | Option de traçage Trace_ZN dans la recherche automatique du gain critique Kcr | 45 |
| 7.2.3 | Comparaison des méthodes de Marge de Module et Ziegler-Nichols | 45 |
| 7.2.3.1 | Comparaison des méthodes dans le plan géométrique de Nyquist | 45 |
| 7.2.3.2 | Comparaison des méthodes dans le domaine temporel | 46 |
| 7.2.3.3 | Autres réglages possibles concernant la méthode de Ziegler-Nichols | 46 |

| | | |
|--------------------------------|---|-----------|
| 7.3 | Méthode de TAKAHASHI | 47 |
| 7.3.1 | Principe de la méthode | 47 |
| 7.3.2 | Calculs | 47 |
| 7.3.3 | Comparaison des méthodes de marge de module (FT1), ZN (FT2), Takahashi (FT3) | 48 |
| 7.3.3.1 | <i>Nyquist</i> | 48 |
| 7.3.3.2 | <i>Réponses indicielles</i> | 48 |
| 7.3.3.3 | <i>Marges de gain et de phase</i> | 49 |
| 8 | SIMULATION NON LINEAIRE DE L'USINE DE REVIN | 49 |
| 8.1 | Méthode de l'étude | 49 |
| 8.2 | Caractéristiques des simulations | 49 |
| ANNEXES | | 51 |
| A. | HYDROSTAB - CALTUR : FEUILLE DE CALCUL EXCEL  | 51 |
| A.1 | Feuille principal « Longueur-Section » | 51 |
| A.2 | - Feuillet secondaire « Débit-Rendement» | 52 |
| B. | VARIATIONS SAISONNIERES – MARNAGE – ADAPTATION DES PID | 53 |
| C. | EXEMPLE DE FICHER D'ENREGISTREMENT D'UNE SESSION HYDROSTAB | 54 |
| D. | STRUCTURE OLEOHYDRAULIQUE DU SYSTEME COPIANT SYSCOP A 2 ETAGES..... | 55 |
| D.1 | Principe de fonctionnement du système copiant double étage | 55 |
| E. | ELEMENTS DES SCHEMATHEQUES <i>HYDROTUR-HYDROSIM</i> | 56 |
| E.1 | Liste des schémathèques HYDROTUR-HydroSim | 56 |
| | 56 | |
| E.2 | Régulateur de vitesse pour turbines FRANCIS | 57 |
| E.3 | Modélisation du circuit Turbine + Adduction par équations analytiques | 58 |
| E.4 | Modélisation du circuit Turbine + Adduction avec colline machine [n11-c11-q11]..... | 59 |
| E.5 | Modélisation du système copiant | 60 |
| E.6 | Modélisation du circuit Réseau..... | 61 |
| F. | AMENAGEMENT ET ORGANISATION DE L'ESPACE SCILAB | 62 |
| G. | USINE HYDROELECTRIQUE DE REVIN | 64 |
| H. | LISTING TYPE APRES EXECUTION DU CONSTRUCTEUR BUILDER.SCE..... | 67 |
| LISTE DES FIGURES | | 69 |

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Scilab Enterprises - Philippe Roux, Scilab - De la théorie à la pratique - I. Les fondamentaux, D-Booker, 2013.
- [2] Scilab Enterprises - Yvon Degré, Serge Steer, Scilab - De la théorie à la pratique - II-Modéliser et simuler avec XCOS, D-Booker, 2014.
- [3] Scilab Enterprises - Laurent Berger, Scilab - De la théorie à la pratique - III. Le traitement du signal, D-Booker, 2014.
- [4] IEC 60308, Turbines hydrauliques – Essais des systèmes de régulation, 2005.
- [5] IEC 61362, Guide pour la spécification des systèmes de régulation des turbines, 2012.
- [6] L. VIVIER, Turbines hydrauliques et leur régulation, PARIS: Editions Albin Michel, 1966.
- [7] Y.Granjon, AUTOMATIQUE - Systèmes linéaires, non linéaires, à temps continu, à temps discret, représentation d'état, NANCY: DUNOD - SCIENCES SUP, 2010.
- [8] E.GODOY, Régulation industrielle, L'usine Nouvelle Série EEA, 2007.
- [9] P. De LARMINAT, Automatique des systèmes linéaires - Tome 3 - Commande, Flammarion Sciences, 1977.
- [10] P. PERRICHON, «Eléments de synthèse pour la réalisation d'un régulateur de vitesse numérique industriel dans la conduite d'un groupe hydraulique,» Grenoble Université - INP - ENSE3, Grenoble, 2011.
- [11] B. GREIVELDINGER, «Etude de la stabilité de réglage d'une centrale hydroélectrique en réseau séparé,» Ecole polytechnique de LAUSANNE, LAUSANNE, 2003.
- [12] Scilab Enterprises - Yvon Degré, Serge Steer, Scilab - De la théorie à la pratique - II-Modéliser et simuler avec XCOS, D-Booker, 2014.

| Type de document | Références |
|---------------------------|-----------------|
| Ingénierie Scilab | [1] [2] [3] |
| Références normatives CEI | [4] [5] |
| Littérature scientifique | [6] [7] [8] [9] |
| Documents universitaires | [10] [11] |

SUPPORT TECHNIQUE - CONTACT



Figure 1 : Support technique du projet HYDROTUR

LISTE DES SYMBOLES

| | |
|------------------|--|
| ω, Ω | Vitesse de rotation du groupe (rd.s ⁻¹) |
| a | Coefficient de célérité de l'onde d'eau (m.s ⁻¹) |
| aut | Coefficient de d'autoréglage du réseau électrique (s.u) |
| FTBF | Fonction de transfert en boucle fermée |
| FTBO | Fonction de transfert en boucle ouverte |
| g | Accélération de la pesanteur (m.s ⁻²) |
| Head | Chute brute ou nette (m) |
| I, MR2 | Inertie Turbine+Alternateur (T.m ²) |
| Kd | Gain de l'action dérivée (s.u) |
| Kp | Gain du régulateur (s.u) |
| L, Leq | Longueur conduite équivalente (m) |
| ma | Marge de module (s.u) |
| W, Power | Puissance du groupe hydraulique (MW) |
| Q | Débit du groupe (m ³ /s) |
| S, Seq | Section conduite équivalente (m ²) |
| Speed | Vitesse de rotation du groupe (rpm) |
| Ta | Temps de lancer mécanique du groupe (s) |
| Td | Constante de temps de l'action dérivée (s) |
| Ti | Constante de temps de l'intégrateur (s) |
| Ts | Temps de manœuvre des organes de réglage (s) |
| Tw | Temps de lancer hydraulique du groupe (s) |
| ty | Constante de temps tachymétrique (s) |

RESUME

HydroStab représente une boîte fonctionnelle construite en langage Scilab, dans la suite logicielle **HYDROTUR**, et est dédiée au calcul de stabilité d'un régulateur de vitesse pilotant une machine hydroélectrique de type FRANCIS, KAPLAN, PELTON.

HydroStab Solution fournit les paramètres de réglage d'un correcteur PID série-parallèle permettant la conduite d'un groupe hydroélectrique avec une marge de sécurité, et sans divergence lors de la mise en service du régulateur sur site.

Au préalable de l'étude, une feuille Excel **CALTUR**, établit une réduction du schéma hydraulique, conforme aux données de la centrale (longueur des conduites par tronçon, sections attenantes), et détermine longueur et section équivalentes d'un groupe unique.

Ces résultats sont ensuite à saisir dans HydroStab.

HydroStab détermine alors un domaine de convergence à atteindre et fournit un quadruplet (K p, T i, T d, K d), avec preuve graphique de programme.

La principale méthode adoptée s'appuie sur une technique mathématique basée dans le **plan de Nyquist**, et propose de forcer le passage de la fonction de transfert en boucle ouverte, par un point **P**, pour garantir une **Marge de gain de 6 dB**, avec une **Marge de module** fixée $ma=0.42$.

Cette valeur est en générale communément admise dans le système de réglage des turbomachines, et est conseillée par Electricité de France.

HydroStab est conforme aux normes internationales CEI 60308 et 61362 dans les résultats calculés.

D'autres méthodes (**Ziegler-Nichols**, **Takahashi**) sont intégrées également à HydroStab pour des études comparatives.

AVANT-PROPOS

Les exemples cités dans ce document s'appuient souvent sur des caractéristiques de la centrale hydroélectrique de Revin, en France.

Ces informations sont normalement disponibles sur le NET, et ne sont donc pas confidentielles (documents publics de l'Électricité De France EDF)

Les résultats calculés ici n'engagent que l'auteur de ce document, en mode Turbine.

Ils ne sont commentés qu'à titre de Tutoriel dans la présentation de HydroStab.

Ils ne remettent nullement en cause les études déjà réalisées par les maitrises d'œuvre ou d'ouvrage, les turbiniers, les bureaux d'étude, l'ingénierie de mise en service, dans le cadre réduit de la régulation de vitesse pour machines tournantes.

Il s'agit ainsi de présenter une méthode systématique pour aborder des calculs de réglages primaires et pertinents à effectuer, dans l'approche des études de stabilité de vitesse d'un groupe hydroélectrique.

L'Annexe G présente une brève description du site de Revin.

1 INTRODUCTION

1.1 Présentation

L'hydroélectricité est une source d'énergie renouvelable importante et vitale, qui convertit l'énergie de l'eau en électricité. Cette source d'énergie peut être réalisée par des unités de production hydroélectrique (centrales), et doivent répondre à de nombreuses sollicitations fonctionnelles (prise de charge, délestage, réglage de la fréquence du réseau, asservissements de débit, de niveau des eaux, ... etc).

Tout changement des conditions de fonctionnement se traduit par des régimes de fonctionnement hydrauliques transitoires qu'il est préférable d'anticiper par des modélisations appropriées des circuits de commande, tant l'enjeu environnemental et de sûreté hydraulique sont des domaines clefs requérant la plus grande attention et la plus grande expertise.

En effet, de nombreux accidents constatés suite à des ruptures de conduites de mise en charge, ou liés à la turbine, surviennent souvent lors de rejets à pleine charge, en raison de grands transitoires hydrauliques.

Par conséquent, il est nécessaire de développer des contrôleurs capables de maîtriser les transitoires hydrauliques.

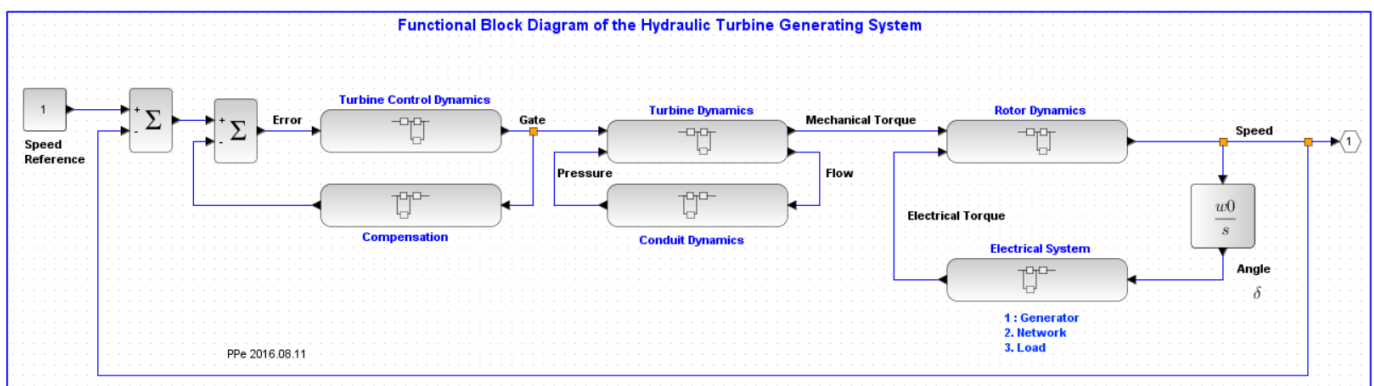


Figure 2 : Diagramme fonctionnel général d'un système de commande hydro-électrique

1.2 Approche linéaire du réglage de stabilité d'un groupe hydro-électrique

La littérature traitant des approches linéaires ou non linéaires des systèmes asservis en Automatique et en Traitement du Signal est conséquente. Les exposés sont nombreux et ont tous leurs avantages et leurs inconvénients.

Il est cependant important de souligner que la méthode adoptée, pour le correcteur de l'asservissement, doit être d'une complexité abordable par le personnel d'exploitation et de mise en service de la centrale ; ou bien, si la méthode est complexe, adjoindre tout logiciel de calcul permettant un réglage pertinent de la machine, en restant compatible avec les techniques opérationnelles dans l'ingénierie industrielle.

L'objet de ce document n'est pas d'exposer à nouveau ce que l'on trouve déjà aisément sur le NET, mais de décrire les procédures adoptées pour le réglage d'un **correcteur de type PID**, dans le cadre du projet **HYDROTUR**.

La méthode sélectionnée et décrite, est dite Méthode de la Marge de Module en boucle ouverte, dans le plan géométrique de NYQUIST.

Cette méthode est déjà très éprouvée par certains turbiniers depuis plus de quarante ans, et a montré son efficacité dans les réglages fins des mises en service.

Le tableau de classement des méthodes de synthèse indiqué en [8] : *REGULATION INDUSTRIELLE chapitre 20 : METHODES DE COMMANDE : SYNTHESE, COMPARAISON ET CRITERES DE CHOIX page 518.*

La synthèse semble confirmer la pertinence de l'utilisation du régulateur PID en milieu industriel, dans le cadre de systèmes SISO¹ mono-entrée mono-sortie.

| Méthode | PID | Fréquentiel autre que PID | Polynomial | Commande prédictive (linéaire) | Approche d'état | Flou |
|---|--|---|---|--|---|----------------------------|
| Compétence en automatique | Faible | Moyenne | Moyenne | Moyenne | Élevée | Très faible |
| Adapté au multivariable | Faible | Non | Non | Oui | Oui | Oui mais difficile |
| Adapté au non-linéaire | Moyen | Non | Non | Non | Non | Oui |
| Retouche sur site | Oui | Oui, si régulateur peu complexe | Non | Non | Non | Oui |
| Potentiel | Moyen | Moyen | Élevé | Élevé | Élevé | Moyen |
| Complexité du régulateur | Faible | Faible à moyenne | Moyenne | Moyenne | Élevée | Faible |
| Volume de calcul (réalisation numérique) | Faible | Faible | Dépend de l'ordre du modèle | Dépend de l'ordre du modèle | Élevé si observateur | Faible |
| Autres | Très présent dans le milieu industriel | Approche graphique | Séparation des dynamiques consigne / perturbation | Possibilité de prendre en compte des contraintes | Séparation des dynamiques consigne / perturbation | Pas de nécessité de modèle |
| | Réglage expérimental possible | Pas de nécessité d'un modèle analytique | Programmation simple de la synthèse automatisée | | Modélisation très générale Démarche systématique | |

Figure 3 : Classement des méthodes de synthèse

Le projet HYDROTUR propose une approche systémique de la régulation de vitesse pour machines tournantes hydrauliques et des modélisations des éléments fonctionnels présentés en *Figure 2* .

¹ SISO : Simple Input-Simple Output

Ces études se traduisent par la fourniture de nombreux documents et composants logiciels de modélisation, spécialement développés avec la plateforme de génie logiciel **Scilab/Xcos**, libre d'accès et **disponible gratuitement sur le NET**.

Une vue d'ensemble du projet est présentée dans le document « **HYDROTUR – Simulateur pour turbines hydrauliques – Guide d'installation et d'utilisation** ». Ce document indique aussi toutes les procédures à suivre pour l'installation complète de HYDROTUR sur un ordinateur type PC sous Windows., dans la version citée de Scilab/Xcos.

Le présent document a pour objectif de fournir une approche linéaire du système de réglage des régulateurs de vitesse en petits mouvements à partir d'un **correcteur PID série-parallèle** ; l'approche non linéaire est largement présentée dans les différentes simulations pour tous types de machine FRANCIS, KAPLAN, ou PELTON à axe horizontal ou vertical : la liste des simulateurs proposés est rappelée en *Annexe E*. En particulier, **les études avec des collines machine (n₁₁, q₁₁ c₁₁)** sont disponibles.

HydroStab Solution représente un élément de calcul dans la suite HYDROTUR, permettant une approche pertinente du réglage du correcteur de vitesse intervenant dans la régulation de vitesse d'une machine hydraulique type FRANCIS, KAPLAN, PELTON.

L'objectif est donc de calculer et de fournir un quadruplet (K_p, T_i, T_d, Kd) de réglage d'un correcteur PID, mis en œuvre dans le système de régulation de vitesse du groupe.

Une étude de stabilité a donc pour objectif :

- de déterminer les paramètres approchant au mieux le réglage d'un régulateur de vitesse d'un groupe électro-hydraulique couplé à un réseau électrique isolé
- de caractériser la réponse en fréquence de ce groupe à des variations de charge sur le réseau, afin de fournir des paramètres de régulation *a priori* au personnel de mise en service et d'éviter une optimisation sur site (laquelle pouvant ne pas être réalisable, ou risquée).

1.3 Terminologie

| | |
|-----------------------------------|--|
| Groupe électro-hydraulique | Ensemble constitué d'une turbine hydraulique et d'un alternateur accouplés sur un même arbre |
| Turbine | Organe de conversion de l'énergie hydraulique (énergie cinétique de l'eau sous pression) en énergie mécanique (couple de rotation de l'arbre). Peut-être de type Pelton, Francis, Kaplan ou Bulbe |
| Alternateur | Organe de conversion de l'énergie mécanique (couple de rotation de l'arbre) en énergie électrique distribuée sur le réseau |
| Réseau | Ensemble des circuits électriques (transformateurs, lignes de transmission, ...) et des consommateurs d'électricité auxquels est relié le groupe |
| Circuit hydraulique | Ensemble des composants (conduites forcées, cheminées d'équilibre, bêche, aspirateur) assurant la circulation de l'eau du bassin supérieur à la turbine et de la turbine au bassin inférieur. |
| Chute brute | Différence de niveau d'eau ² entre le bassin supérieur et le bassin inférieur |
| Chute nette | Différence de pression d'eau ² aux "bornes" de la turbine, c'est-à-dire entre la sortie de bêche et l'entrée d'aspirateur pour Francis, Kaplan ou bulbe, entre l'entrée d'injecteur(s) et la pression atmosphérique pour Pelton |

² Plutôt que d'exprimer cette valeur en pascals ou en bars, unités classiques de pression, cette valeur est généralement donnée en mètres, soit la hauteur de la colonne de liquide nécessaire pour créer une pression identique. Avec de l'eau, on parle de **mètres de colonne d'eau** (noté **mCE**). $\Delta p = \rho.g.h$ où ρ est la masse volumique du fluide et g l'accélération de la pesanteur .

Pour de l'eau 1 000 kg·m⁻³ à 4 °C, et avec la valeur normale de la pesanteur $g = 9,806 65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$), la conversion est la suivante :


- 1 bar (10⁵ pascals) correspond à 10,1972 mCE ;
- Inversement, 1 mCE correspond à 98,0664 mbar.

| | |
|--------------------------|---|
| Organe de réglage | Organe servant à contrôler le débit d'eau envoyé à la turbine : vannage pour une Francis, injecteur(s) pour une Pelton, couple vannage-pales pour une turbine Kaplan ou un Bulbe |
| Système copiant | <p>Ensemble dont la fonction est de transformer une consigne de position électrique en une position de l'organe de réglage.</p> <p>Il est constitué d'un actionneur qui transforme une consigne électrique en un débit d'huile sous pression, d'un distributeur (si nécessaire) qui amplifie le débit d'huile, d'un servo-moteur (commandé par le débit d'huile issu de l'actionneur ou du distributeur) qui entraîne l'organe de réglage à la position de consigne, d'un système de mesure de position qui transforme la position du servomoteur ou de l'organe de réglage en un signal électrique, et d'un asservissement électronique chargé d'élaborer la consigne électrique de l'actionneur en fonction de l'écart entre consigne de position (issue du régulateur de vitesse) et position mesurée par le capteur (Voir Annexe D.1)</p> |

2 FOURNITURE

2.1 Installation de HydroStab

Le projet HYDROTUR-HydroStab est fourni à partir d'un fichier « HydroStab.zip », qu'il faut décompresser.

 HydroStab.zip

Le paquet peut être installé de différentes façons :

1. Par l'installateur de modules ATOMS de Scilab en pointant HYDROTUR-HydroStab dans le module « **Optimization** »³
2. En entrant la commande `atomsInstall("HydroStab")` dans la console de Scilab
3. Manuellement, en déposant et décompressant le fichier ZIP dans un répertoire défini par l'utilisateur, comme « HYDROTUR\HydroStab\» par exemple.

Figure 4 : Différentes méthodes d'installation de HydroStab

 En mode Installation automatique, les fichiers du paquet HydroStab sont installés dans le Roaming du système

Le lieu exact peut être connu en tapant la commande `SCIHOME` dans la console Scilab.

On peut aussi entrer la commande `chdir(SCIHOME)` pour accéder directement à ce répertoire.

Puis accéder au répertoire `atoms` à l'aide du navigateur de fichier Scilab par un double clic

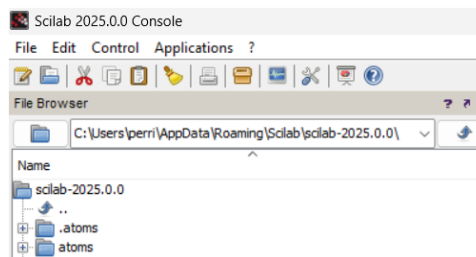


Figure 5 : Répertoire d'installation automatique de de HydroStab

Ce paquet logiciel comprend les éléments suivants :

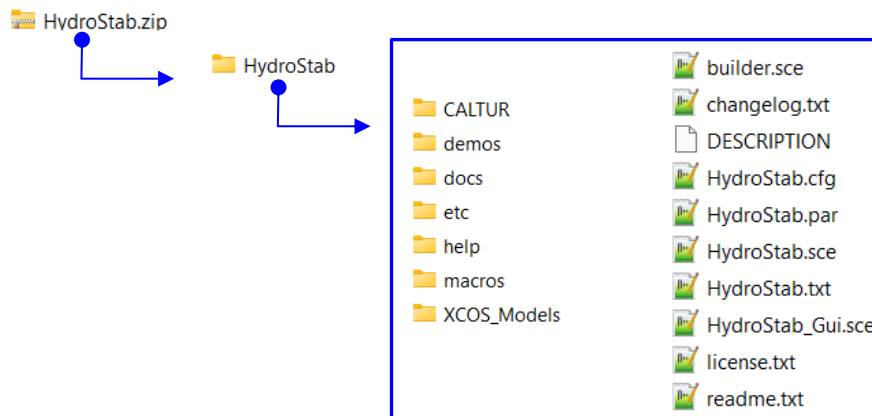


Figure 6 : Décompactage du fichier HydroStab.zip

³ Dans ce cas, entrer « atomsGui » dans la console Scilab et accéder à l'entité « Optimization »

| Répertoire ou Fichier | Contenu |
|-----------------------|--|
| CALTUR | Feuilles de calcul (fr-en) au format Excel xlsx (voir §4.1, Annexe A) <ul style="list-style-type: none"> Calcul de la longueur et section équivalentes d'un circuit hydraulique |
| demoss | Exemples de réalisation faites sous HydroStab – Sauvegardes de ces configurations pour relancer les simulations |
| docs | Documentation HydroStab en langue française et anglaise, au format .pdf |
| etc | Initialisation (fichier HydroStab.start) et finalisation (fichier HydroStab.quit). Scripts utilisés dans le chargement du module HydroStab loader.sce ou son déchargement unloader.sce |
| help | <ul style="list-style-type: none"> Fichiers d'aide au format XLM divisés en sous-répertoires en langue française (fr) et anglaise (en) Ensemble des images utilisées dans les aides en ligne des composants (sous-répertoire « gui ») |
| macros | Macros (Fichiers « .sci ») Ensemble des fichiers sources écrits en langage Scilab |
| XCOS_Models | Modèles des fonctions de transfert utilisées dans HydroStab, au format graphique XCOS « zcos » <ul style="list-style-type: none"> FTBO.zcos : Fonction de transfert du procédé en boucle ouverte FTBF.zcos : Fonction de transfert du procédé en boucle fermé Test PID Parallèle - Mixte.zcos |
| builder.sce | Constructeur principal du module HydroStab |
| changelog.txt | Historique des changements de versions HydroStab |
| DESCRIPTION | Description sommaire de HydroStab |
| HydroStab.cfg | Sauvegarde du contexte d'exécution de la dernière utilisation de HydroStab |
| HydroStab.par | Paramétrisation par défaut de la boîte à outils HydroStab |
| HydroStab.sce | Lancement de HydroStab Lancement direct également possible avec la commande à saisir dans la console Scilab : exec(HydroStab) |
| HydroStab.txt | Ensemble des textes utilisés dans le logiciel HydroStab. Langues Française et Anglaise |
| HydroStab_Gui.sce | Interface graphique de HydroStab – User Guide Interface |
| licence.txt | Déclaration de conformité à la licence CeCILL Version 2.1 |
| readme.txt | Recommandation pour l'installation de HydroStab sur l'ordinateur |

Figure 7 : Contenu du répertoire HydroStab

2.2 Désinstallation de HydroStab

- Si HydroStab a été installé en tant que module ATOMS de Scilab, la désinstallation est réalisée en lançant, dans la console Scilab, la commande :

atomsRemove("HydroStab")

- Si HydroStab a été installé dans un répertoire utilisateur, détruire ce répertoire.

3 CONSTRUCTION ET CHARGEMENT DE LA BOITE A OUTILS HYDROSTAB DANS SCILAB

3.1 Avant-propos

La construction de la boîte à outils **HydroStab** nécessite une bonne compréhension de l'ouvrage [1]⁴.

Son utilisation ne nécessite que la connaissance du présent manuel « **HYDROTUR - HydroStab - Guide d'utilisation** », et des composants qu'il intègre.

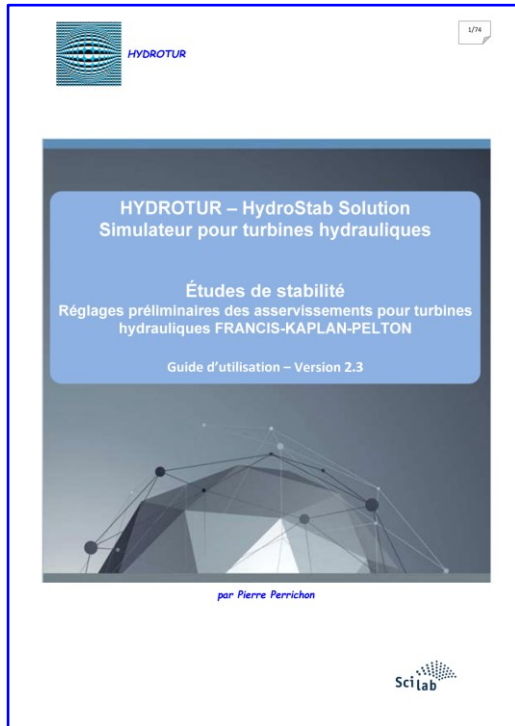


Figure 8 : Ouvrage « Les Fondamentaux » de Scilab

3.2 Prérequis

Les codes sources de l'exécutif sont entièrement écrits en langage Scilab, et disponibles dans le répertoire **HydroStab\macros**

Aucun prérequis n'est donc nécessaire à son utilisation

3.3 Le constructeur builder.sce

Le fichier script **builder.sce**, situé dans le répertoire HydroStab, crée la bibliothèque HydroStab et fournit tous les fichiers utiles à son utilisation :

- Compilation de l'ensemble des macros « .sci », associées au sous-répertoire macros de HydroStab\macros

De plus, le constructeur builder.sce fournit et rajoute les fichiers suivants dans le répertoire HydroStab :

- | | |
|-----------------|--|
| 1. clearner.sce | Annule et efface tous les fichiers créés par le constructeur builder.sce |
| 2. loader.sce | Chargement de la bibliothèque HydroStab dans Scilab. |
| 3. unloader.sce | Déchargement de la bibliothèque HydroStab dans Scilab |

Un listing, obtenu par copie d'écran après lancement du constructeur builder.sce dans Scilab, est fourni en *Annexe H*

⁴ Ce livre peut être commandé sur le NET aux éditions D-Booker


3.4 Le chargeur loader.sce

3.4.1 Chargement

Le chargeur **loader.sce** est créé par l'interface **builder.sce**, comme indiqué au §3.3.

L'exécution de ce script charge la bibliothèque **HydroStab** dans **Scilab**.

Dans le cas d'une installation automatique de HydroStab, le fichier loader.sci est lancé automatiquement à l'ouverture de Scilab.

 **En cas d'installation manuelle (cas n°3, voir Figure 4), le chargeur doit être lancé par l'opérateur avant d'utiliser HydroStab.**

On obtient dans la console Scilab la liste des opérations réalisées :

```

--> exec('C:\0 - Test\HydroStab\loader.sce', -1)
Start HydroStab Version 2.3.0 : Etude de stabilité - Réglage préliminaire des asservissements
  Load macros
  Load help

...Entrer la commande suivante pour démarrer une session HydroStab :
                                exec("TMPDIR\Run_HydroStab")
...ou lancer le script "Run_HydroStab" dans la fenêtre SciNotes

--> |
  
```

Figure 9 : Exemple de chargement de la bibliothèque HydroStab dans Scilab – Utilisation du fichier loader.sce

Comme indiqué dans la figure ci-dessous, l'opérateur lance une session HydroStab en saisissant la commande **exec(«TMPDIR\HydroStab»)** dans la console Scilab, ou bien en exécutant le script « **Run_HydroStab** » dans la partie SciNotes de Scilab, indiqué en *Figure 13*

3.4.2 Variable globale due au lancement de HydroStab

L'exécution du fichier « loader.sce » charge l'ensemble des macros compilées, et crée une variable globale **SCI_HYDROTUR_HydroStab**, disponible durant toute la session d'utilisation de HydroStab

```

--> SCI_HYDROTUR_HydroStab


SCI_HYDROTUR_HydroStab =

"C:\0 - Test\HydroStab\"
  
```

Figure 10 : Variable d'environnement **SCI_HYDROTUR_HydroStab**

Cette variable pointe sur le répertoire d'installation de HydroStab

3.4.3 Troubleshooting

 **Le fichier loader.sce n'est pas compatible descendant selon les versions de Scilab. Par exemple, il n'est pas possible de charger HydroStab créé avec Scilab 2025.0.0 dans Scilab 2024.1.0, ou versions précédentes.**

Il est alors nécessaire de relancer le constructeur builder.sce dans la version appropriée de Scilab, surtout lorsque l'installation de HydroStab est réalisée en mode manuel, comme indiqué dans la *Figure 4*.

4 GUIDE D'UTILISATION

4.1 Réduction des schémas hydrauliques - EXCEL CALTUR Solution

4.1.1 Principe

CALTUR propose une méthode de calcul pour la réduction du schéma hydraulique de la centrale, afin de le ramener à l'étude d'un circuit simple ne comportant plus qu'une seule turbine, alimentée par une adduction d'eau au travers d'un seul conduit de longueur Leq et de section uniques Seq.

Ces deux données sont ensuite utilisées dans les circuits de calcul du logiciel HydroStab.

 **La feuille Excel de calcul CALTUR est fournie dans le répertoire HydroStab\CALTUR, en langue anglais et français.**

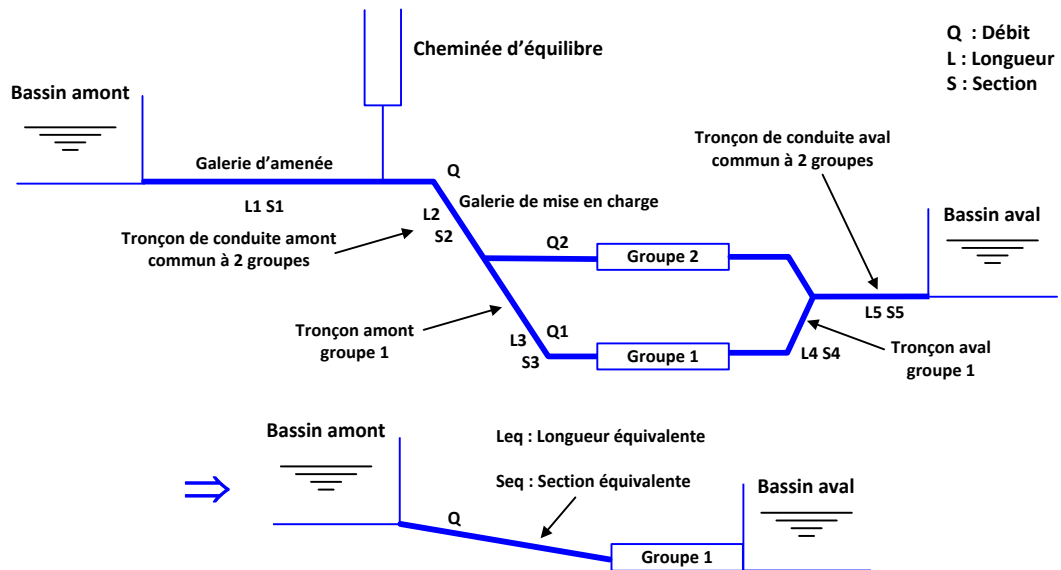


Figure 11 : Réduction du schéma hydraulique - Calculs préliminaires à l'étude de stabilité d'un groupe hydraulique

L'Annexe A présente les feuilles de calcul utilisées dans le calculateur **CALTUR**.

Noter que **Leq** et **Seq** peuvent être également fournies par le service d'expertise hydraulique⁵.

Dans la suite des calculs, et en première approximation, il n'est pas tenu compte des pertes de charge dans le circuit hydraulique, contrairement à l'approche non linéaire des circuits de simulation proposés dans HYDROTUR et qui prend en compte cette donnée, calculée ou imposée.

4.1.2 Éléments de calcul

Le calculateur **HydroStab** utilise un modèle simplifié, déduit d'une étude préliminaire du circuit hydraulique.

Cette étude détermine les longueur et section équivalentes **Leq** et **Seq**, permettant de ramener par des méthodes connues un circuit hydraulique complexe à une forme simple, comme indiqué sur la figure ci-dessus.

Rappel non exhaustif de quelques formules utilisées dans cette étude :

| | |
|-----------------------------|---|
| $L_{eq} = \sum_{i=1}^n L_i$ | $\frac{L_{eq}}{S_{eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{S_i} \Rightarrow S_{eq} = \frac{L_{eq}}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{S_i}}$ |
|-----------------------------|---|

Bien entendu, il est également de prendre en compte les réductions de section dans le circuit. Par exemple, pour un tronçon de section variable :

| | |
|--|------------------------|
| | $S = \sqrt{S_i * S_o}$ |
|--|------------------------|

Ces paramètres créent les variables internes :

- ag** : $ag = \frac{ce}{g * Seq}$ utilisé dans certains blocs TURBADDUC, pour les circuits non pourvus de collines machine.

⁵ Voit aussi Figure 91

- **Dh** :
$$Dh = \sqrt{\frac{4 * Seq}{\pi}} \text{ (m)}$$
 Diamètre hydraulique
 - Le nombre de Reynolds, à titre indicatif, **Re** :
$$Re = \frac{2 * rho * Qnom}{mu \sqrt{\pi * Seq}}$$
 ou bien
$$Re = \frac{V * rho * Dh}{mu}$$
- , formule dans laquelle désigne **V** la vitesse moyenne de l'eau :
$$V = \frac{Qnom}{Seq}$$

4.2 HydroStab Solution

4.2.1 Principe de HydroStab

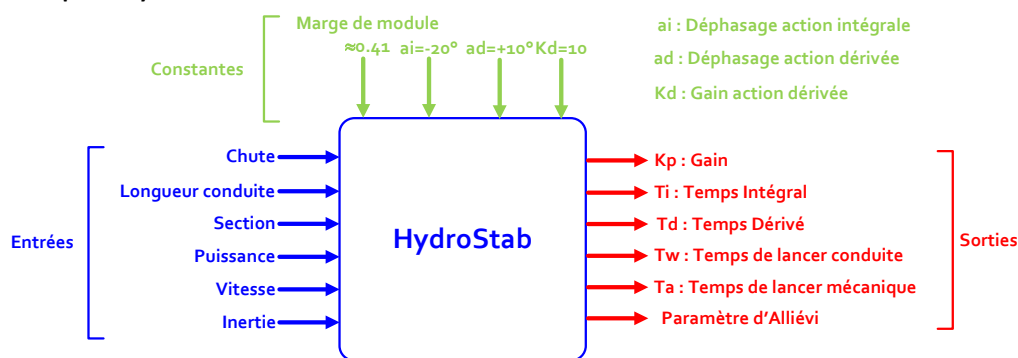


Figure 12 : Circuit de calcul des paramètres d'un PID Vitesse - Méthode de la Marge du Module

HydroStab fournit les paramètres de réglage d'un correcteur PID permettant la conduite d'un groupe hydroélectrique avec une marge de sécurité, et sans divergence lors de la mise en service.

La méthode adoptée s'appuie sur une technique mathématique développée partiellement dans ce document.

Cette méthode est nommée **Méthode de la Marge de Module**.

A partir des données hydrauliques à renseigner dans le logiciel de calcul, et d'un domaine de convergence à atteindre et établi en hypothèse par des termes constants, un quadruplet (K_p , T_i , T_d , K_d) est proposé, avec preuve graphique de programme.

4.2.2 Fenêtre d'accueil de Scilab

1. Lancer une session Scilab
2. Si HydroStab a été installé manuellement, exécuter au préalable le fichier de chargement « loader.sce » dans le répertoire d'installation choisi par l'utilisateur
3. Pour lancer HydroStab :
 - Soit par un clic sur le fichier **Run_HydroStab** dans la fenêtre Scinotes, puis en lançant le script en actionnant la touche flèche indiquée en *Figure 13*.
 - Soit en exécutant directement la commande **exec(« TMPDIR\HydroStab »)** dans la console Scilab
4. On peut se positionner, après un premier lancement, dans le répertoire d'installation de HydroStab, en tapant dans la console la commande :

chdir(SCI_HYDROTUR_HydroStab)

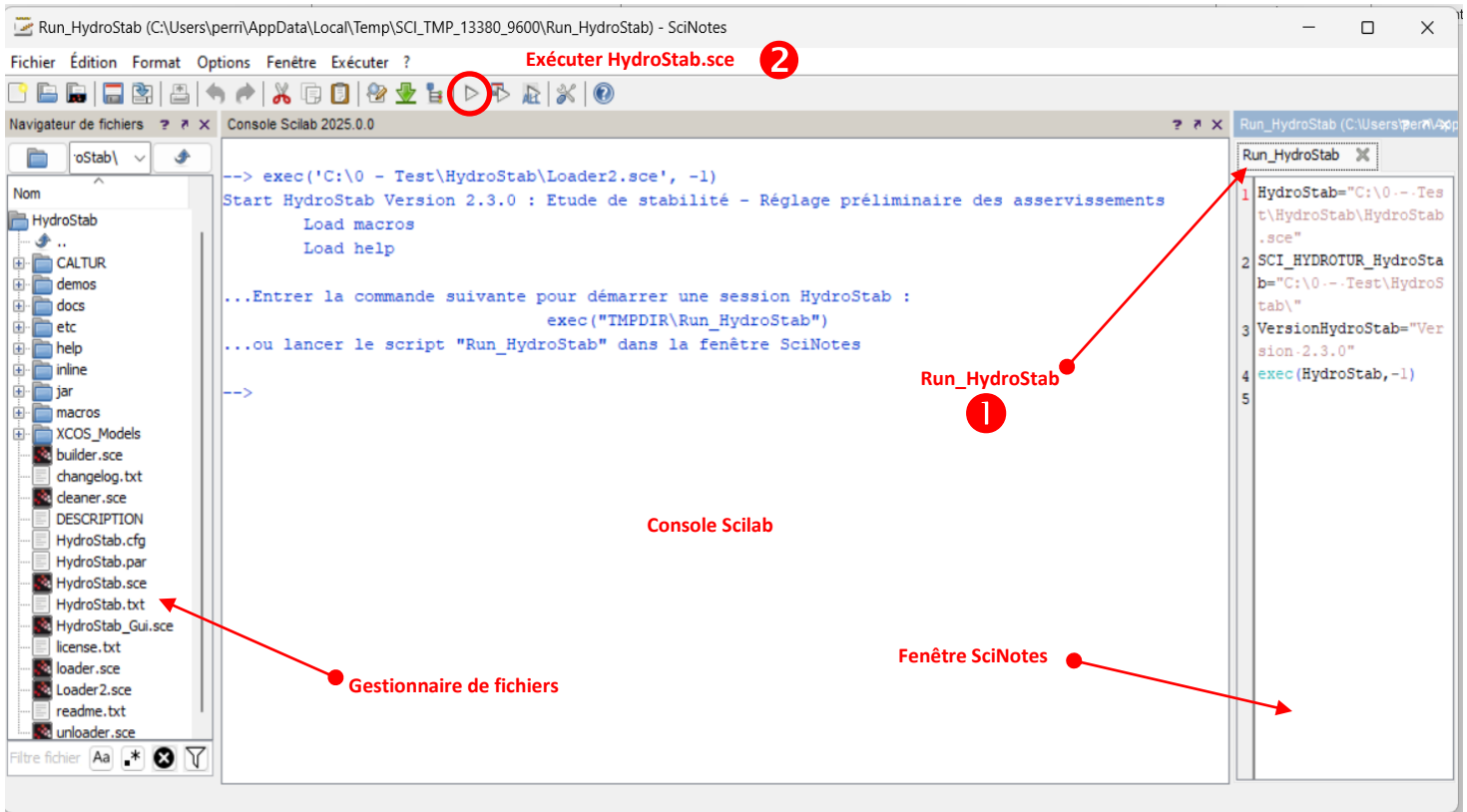


Figure 13 : Fenêtre d'accueil Scilab et lancement du script "Run_HydroStab"

☞ Un aménagement et une organisation de l'espace Scilab est proposée en *Annexe F*

4.2.3 Espace d'accueil

Les données de calcul sont à saisir dans un tableau unique, présenté ci-dessous.

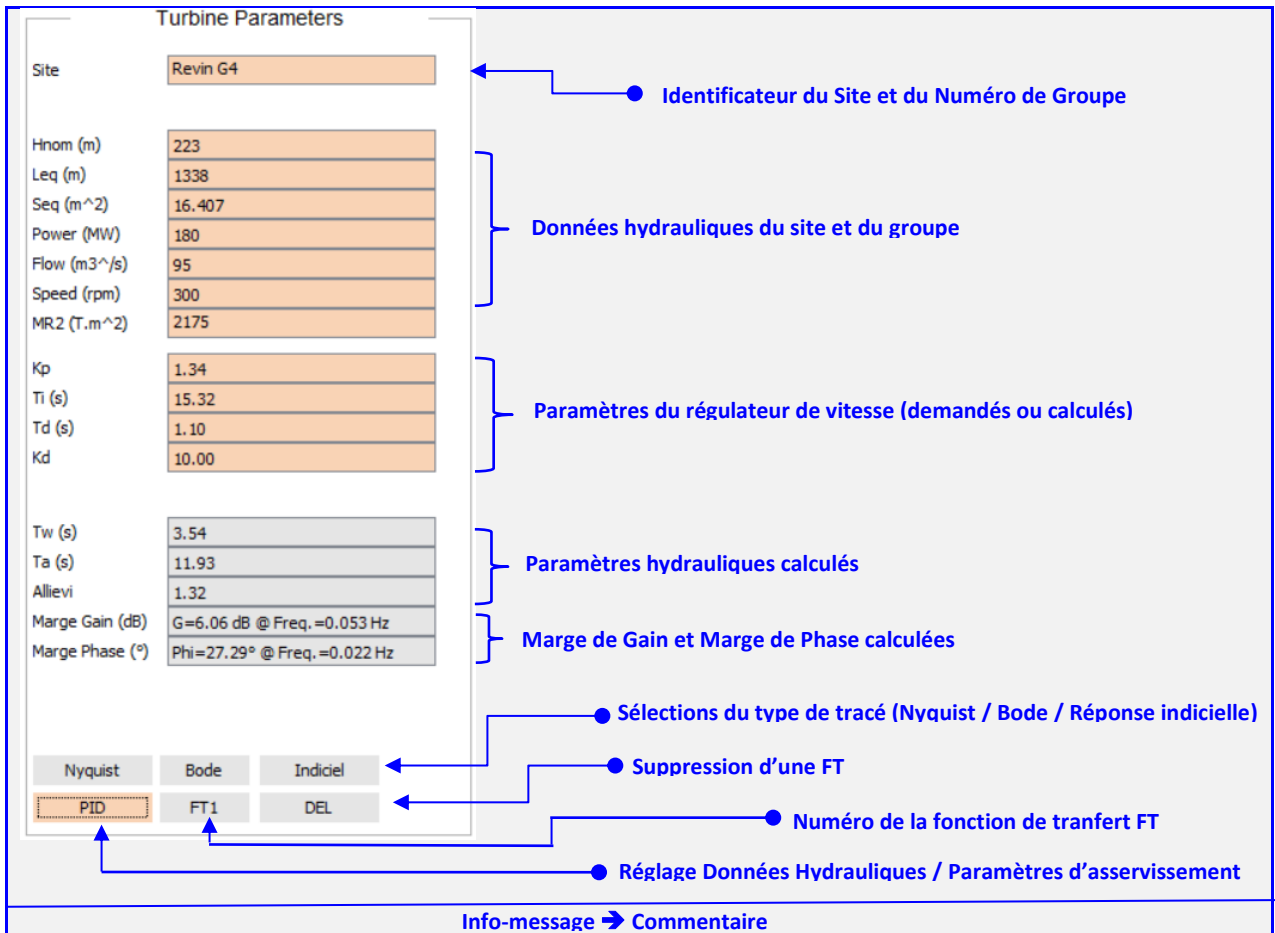


Figure 14 : Fenêtre d'accueil de HYDROTUR - HydroStab Solution

4.2.3.1 Boutons Nyquist Bode Indiciel

- Les clefs Nyquist et Bode sont utilisées pour tracer le lieu de Nyquist ou le plan de Bode de la fonction de transfert FTBO en boucle ouverte du procédé, réglé par un correcteur de type PID série-parallèle. Les balayages en fréquence, $f_{min_n}=0.01\text{Hz}$ et $f_{max_n}=100\text{ Hz}$ dans le plan de Nyquist, ou $f_{min_b}=0.01\text{Hz}$ et $f_{max_b}=10\text{ Hz}$ dans le plan de Bode, peuvent être ajustés, si besoin, en éditant le fichier « HydroStab.par ».
- La fonction de transfert FTBF en boucle fermée du procédé rebouclé par le correcteur PID, est tracée avec la clef Indiciel. Le scope numérique obtenu, représente la réponse temporelle du système à un double échelon de perturbation, symétrique aux temps $t=0$ et au temps $T_{Sim}/2$, où T_{Sim} est la durée de la simulation programmable.

T_{Sim} , durée de la simulation, et A_{Ech} ; amplitude de l'échelon peuvent être dans le fichier « HydroStab.par », ainsi que les valeurs minimale y_{min_Temp} et maximale y_{max_Temp} de l'ordonnée du scope numérique.

Les 3 boutons Nyquist Bode Indiciel sont utilisés pour valider les champs de données Hydraulique et/ou Régulateur, saisies par l'opérateur

Un clic consécutif sur un même de ces boutons provoquent l'affichage de la fonction de transfert suivante :



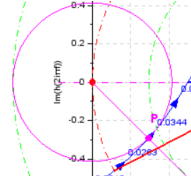
4.2.3.2 Bouton PID

PID

Les zones de saisie dépendent de l'activité du bouton PID, et sont colorées en conséquence, dans les fenêtres d'édition.

Si la touche PID est relâchée, l'opérateur saisit uniquement les données hydrauliques de la machine. Dans ce cas, le tracé ne se réfère qu'au seul réglage (K_p , T_i , T_d , K_d), calculé par HydroStab.

Dans le plan de Nyquist, ce tracé passe obligatoirement par le point optimal⁶.
 La marge de gain prévue est alors de 6 dB pour une Marge de Module à 0.41 (+3dB)



| PID | | PID | |
|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Site | Revin G4 | Site | Revin G4 |
| Hnom (m) | 223 | Hnom (m) | 223 |
| Leq (m) | 1338 | Leq (m) | 1338 |
| Seq (m ²) | 16.407 | Seq (m ²) | 16.407 |
| Power (MW) | 180 | Power (MW) | 180 |
| Flow (m ³ /s) | 95 | Flow (m ³ /s) | 95 |
| Speed (rpm) | 300 | Speed (rpm) | 300 |
| MR2 (T.m ²) | 2175 | MR2 (T.m ²) | 2175 |
| Kp | 1.34 | Kp | 1.34 |
| Ti (s) | 15.32 | Ti (s) | 15.32 |
| Td (s) | 1.10 | Td (s) | 1.10 |
| Kd | 10.00 | Kd | 10.00 |
| Tw (s) | 3.54 | Tw (s) | 3.54 |
| Ta (s) | 11.93 | Ta (s) | 11.93 |
| Allievi | 1.32 | Allievi | 1.32 |
| Marge Gain (dB) | G=6.06 dB @ Freq.=0.053 Hz | Marge Gain (dB) | G=6.06 dB @ Freq.=0.053 Hz |
| Marge Phase (°) | Phi=27.29° @ Freq.=0.022 Hz | Marge Phase (°) | Phi=27.29° @ Freq.=0.022 Hz |

Figure 15 : Menus pour le réglage des asservissements

Si la touche PID est enfoncée, l'opérateur peut empiler plusieurs quadruplets de réglage (K_p , T_i , T_d , K_d) afin de visualiser simultanément leurs efficacités ou bien modifier les données hydrauliques.

Ce dispositif facilite ainsi les réglages optimaux, en prenant en compte des variations importantes du marnage (variation de la chute Head), ou bien le point de fonctionnement en puissance (Power) ou débit (Flow).

Note : un calcul optimal déclenché avec le bouton PID grisé, provoque le calcul du quadruplet (K_p , T_i , T_d , K_d) suivant la technique de la Marge de Module; puis le mode PID redevient aussitôt actif.

4.2.3.3 Bouton FTx

FT1

Le bouton sélectionne une fonction de transfert parmi N calculées. Elle affiche le numéro de la fonction de transfert indiquée principalement dans les champs K_p , T_i , T_d , K_d , Marge de Gain et Marge de Phase, ainsi que les données hydrauliques de l'enregistrement.

⁶ Voir § 7.1 Méthode de la Marge de Module - § 7.1.1 - Critère de stabilité dans le plan de Nyquist

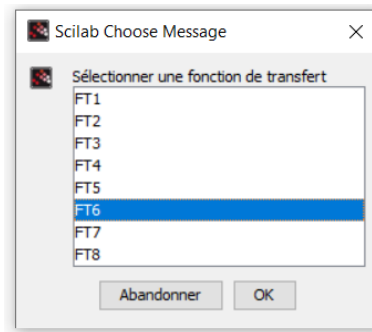


Figure 16 : Sélection d'une FT parmi N avec le BP

FT1

4.2.3.4 Bouton DEL

DEL

Le bouton **DEL** sélectionne une fonction de transfert parmi N pour la supprimer du faisceau de loi. Une demande de confirmation est proposée pour éviter toute erreur de manipulation.

👉 La suppression définitive n'a lieu que si la configuration est à nouveau enregistrée.

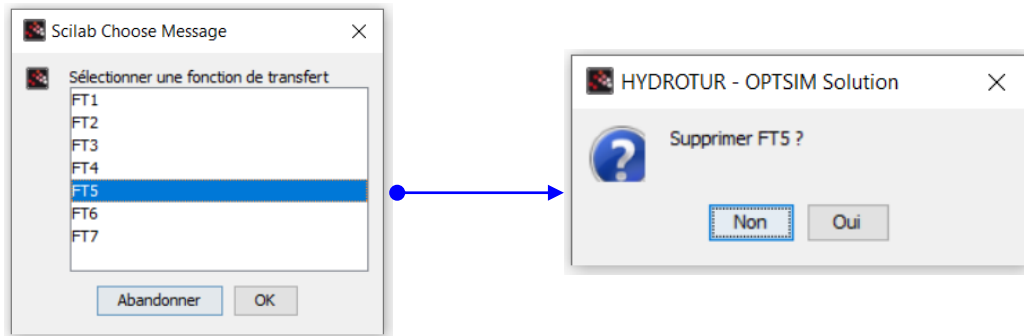


Figure 17 : Suppression d'une FT parmi N

DEL

4.2.3.5 Impression des légendes dans la console Scilab

Dans une session HydroStab, les légendes des graphes sont systématiquement ordonnées par leurs ordres de création, suivant les réglages engagés dans la simulation (FT1, FT2...etc.)

La signification des légendes est disponible sur la console Scilab, après un clic dans cet élément de l'écran :

```

...Load HydroStab File Parameters :
C:\0 - Test\HydroStab\demos\Revin\HydroStab - Revin G4 - 01.par

--- 21/11/2024 - 16:11:36 ----- Nyquist - FTBO
FT1 :   Marge Module
      Kp=1.34 Ti=15.32 s Td=1.10 s Kd=10.00
      Marge de Gain G=6.06 dB @ Freq.=0.053 Hz           Marge de Phase Phi=27.29° @ Freq.=0.022 Hz

FT2 :   Ziegler-Nichols
      Kp=1.65 Ti=10.36 s Td=2.07 s Kd=10.00
      Marge de Gain G=3.45 dB @ Freq.=0.064 Hz           Marge de Phase Phi=21.54° @ Freq.=0.030 Hz

FT3 :   User
      Kp=1.80 Ti=13.00 s Td=1.00 s Kd=10.00
      Marge de Gain G=3.15 dB @ Freq.=0.049 Hz           Marge de Phase Phi=16.98° @ Freq.=0.030 Hz
    
```

Figure 18 : Impression des légendes et des opérations conduites dans la console Scilab

4.2.3.6 Outils graphiques disponibles

La barre d'outils graphiques standard de Scilab/Xcos, dans les fenêtres graphiques, est maintenue dans le GUI⁷ HydroStab :

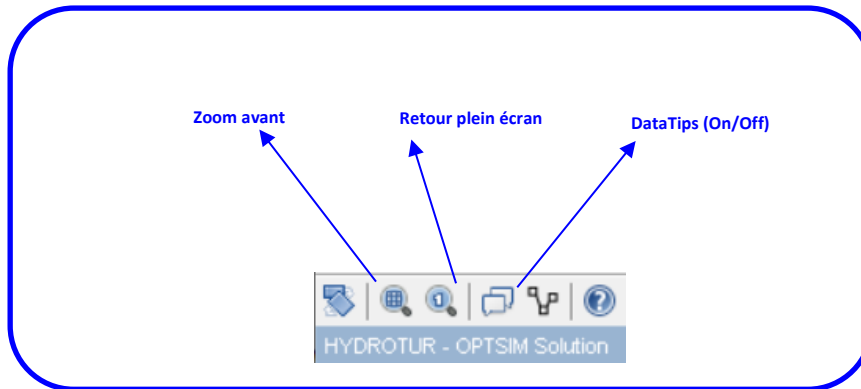



Figure 19 : Barre d'outils graphiques Standard de Scilab

1. Zoom avant

- Le zoom avant est disponible avec l'icône  :

Encadrer la zone à agrandir avec la souris avec le bouton droit de la souris, puis relâcher la souris

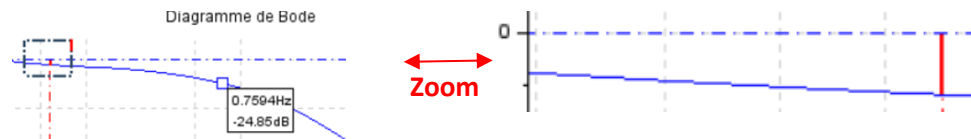



Figure 20 : Zoom dans les fenêtres graphiques

Il est également possible de zoomer avant-arrière, dans la fenêtre graphique, avec la molette de la souris.

2. Datatips

Le mode DataTips (marquage des données dans un graphique) est automatiquement mis en œuvre au

lancement de HydroStab. Il peut également être contrôlé avec l'outil 

Pour rappel :

Un clic gauche sur la courbe crée un datatip et un clic droit sur le datatip le supprime.

4.3 Menus dédiés dans HydroStab

4.3.1 Barre des menus

| | | | |
|---|--|---|--|
| <p>Fichier Méthodes ?</p> <ul style="list-style-type: none"> Nouveau Charger Sauvegarder Fermer | <p>Méthodes ? Langues</p> <ul style="list-style-type: none"> Ziegler-Nichols Takahashi | <p>? Langues</p> <ul style="list-style-type: none"> Commentaire Nyquist Symétrique Nyquist -3 dB Aide en ligne About HydroStab About Scilab | <p>Langues</p> <ul style="list-style-type: none"> Français English |
| Menu Fichier | Menu Méthode | Menu ? | Menu Langues |

⁷ GUI : Graphic User Interface

4.3.2 Menu « Fichier »

4.3.2.1 Créer une nouvelle configuration

La fonction de création d'une nouvelle configuration, est précédée d'une demande de confirmation de l'action, afin d'éviter toute perte inopinée du travail en cours :

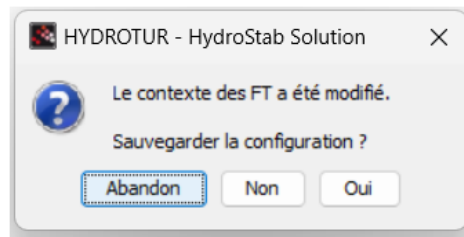


Figure 21 : Demande de confirmation dans la création d'une nouvelle configuration

Dans l'affirmative, une nouvelle page de travail s'affiche, en indiquant la « configuration par défaut » de HydroStab :

| Paramètres Turbine | | | | | | | |
|---|-----------------------------|----------|------|----------|-----|-----|-----|
| Site | XxXxXx | | | | | | |
| Hnom (m) | 80.6 | | | | | | |
| Leq (m) | 128 | | | | | | |
| Seq (m ²) | 112 | | | | | | |
| Power (MW) | 778 | | | | | | |
| Flow (m ³ /s) | 1100 | | | | | | |
| Speed (rpm) | 75 | | | | | | |
| MR2 (T.m ²) | 112500 | | | | | | |
| Kp | 2.02 | | | | | | |
| Ti (s) | 7.84 | | | | | | |
| Td (s) | 0.56 | | | | | | |
| Kd | 10.00 | | | | | | |
| Tw (s) | 1.59 | | | | | | |
| Ta (s) | 8.92 | | | | | | |
| Allievi | 6.21 | | | | | | |
| Marge Gain (dB) | G=6.50 dB @ Freq.=0.103 Hz | | | | | | |
| Marge Phase (°) | Phi=27.24° @ Freq.=0.043 Hz | | | | | | |
| <table border="1"> <tr> <td>Nyquist</td> <td>Bode</td> <td>Indiciel</td> </tr> <tr> <td>PID</td> <td>FT1</td> <td>DEL</td> </tr> </table> | | Nyquist | Bode | Indiciel | PID | FT1 | DEL |
| Nyquist | Bode | Indiciel | | | | | |
| PID | FT1 | DEL | | | | | |

Figure 22 : Configuration par défaut de HydroStab

Il faut donc re-saisir l'ensemble des données communiquées pour l'étude de stabilité, et enregistrer les données avec un nom de site et éventuellement un numéro de groupe

4.3.2.2 Sauvegarde d'une configuration

L'enregistrement d'une session de HydroStab est réalisé avec la fonction « Sauvegarde »

Un choix du mode de sauvegarde est proposé dès l'engagement du menu :

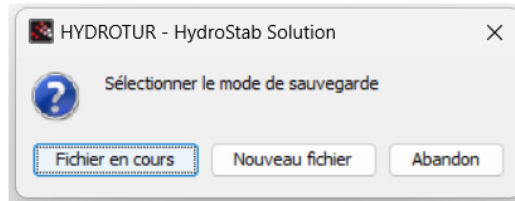


Figure 23 : Sélection du mode de sauvegarde

L'opérateur peut donc :

- Modifier la configuration du fichier existant
- Enregistrer la configuration avec une nouvelle numérotation automatique du fichier d'enregistrement
- Retourner simplement sur la session HydroStab en cours, sans aucune modification

L'enregistrement contient l'ensemble unique de la configuration hydraulique du site, et tous les essais portés avec différentes valeurs des réglages hydrauliques et des quadruplets (K_p , T_i , T_d , K_d).

1. Sélectionner le répertoire de sauvegarde :

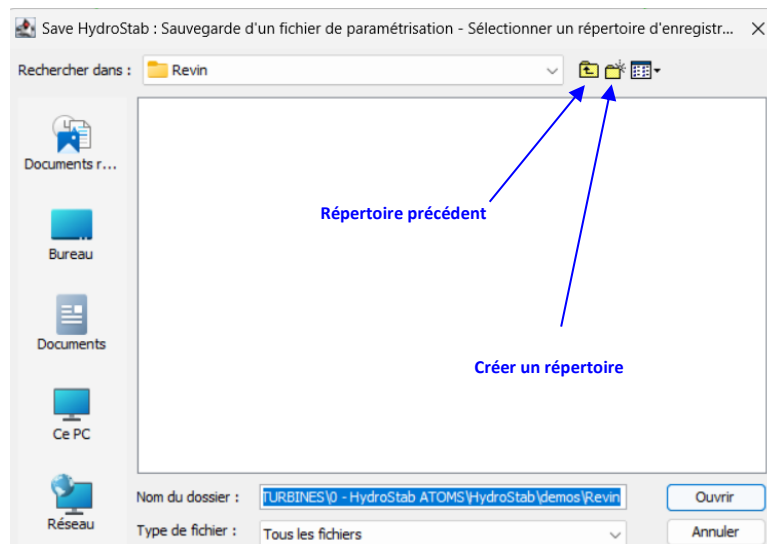


Figure 24 : Sélection d'un répertoire de sauvegarde

2. Valider ou Annuler l'opération

Le nom du fichier d'enregistrement est automatique, et est constitué :

- du préfixe « HydroStab - »
- de l'identifiant du site indiqué dans la fenêtre d'HydroStab. Par exemple Revin G4
- ce nom est associé à un numéro d'enregistrement automatiquement calculé : s'il s'agit du premier enregistrement, l'index vaut 01. Sinon, l'index égale celui du dernier enregistrement effectué, augmenté de 1 unité.
- le suffixe de l'enregistrement est « .par »



Figure 25 : Nomination des fichiers d'enregistrements d'une session HydroStab



La structure détaillée d'un fichier de sauvegarde est indiquée en *Annexe C*

3. L'enregistrement étant validé et effectué, une fenêtre rappelle le nom de sauvegarde

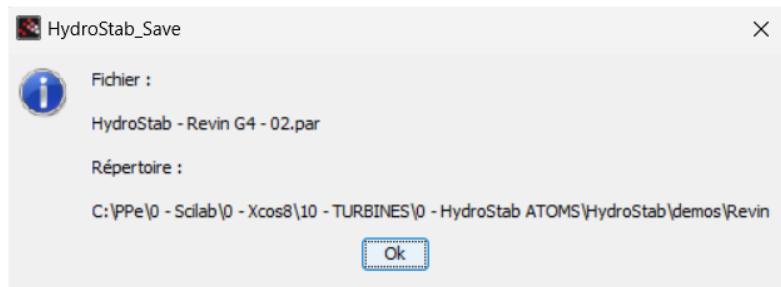


Figure 26 : Confirmation de l'enregistrement d'une session HydroStab

4.3.2.3 Rechargement d'une configuration

1. Pour recharger une configuration de travail, enclencher la fonction « Charger », et faire apparaître le gestionnaire de fichier :

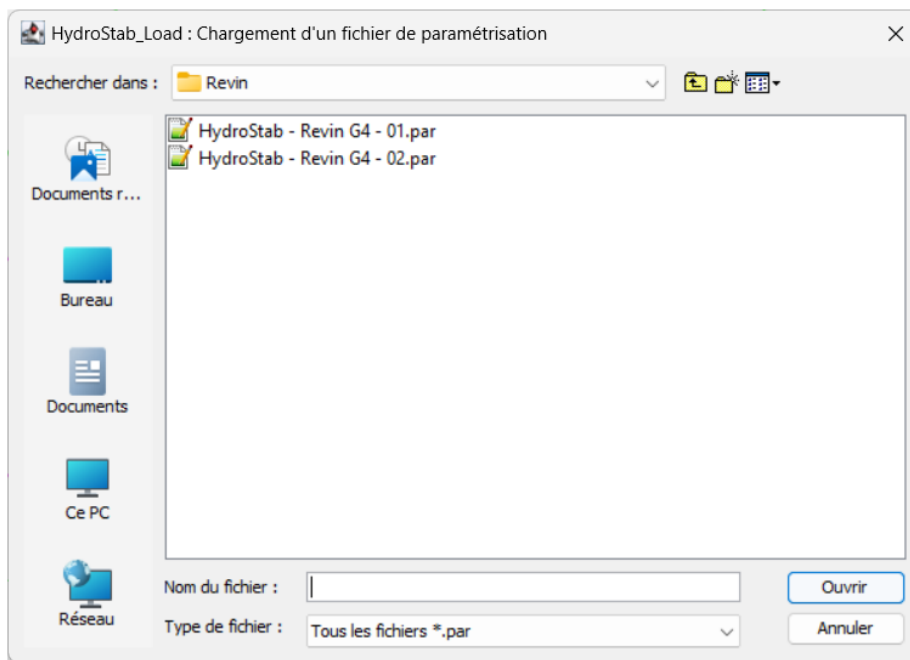


Figure 27 : Rechargement d'un fichier de paramétrisation

Le gestionnaire recherche les fichiers de suffixe « .par » dans l'arborescence sélectionnée.

2. Après validation, la configuration, les calculs, et les tracés sont restitués :

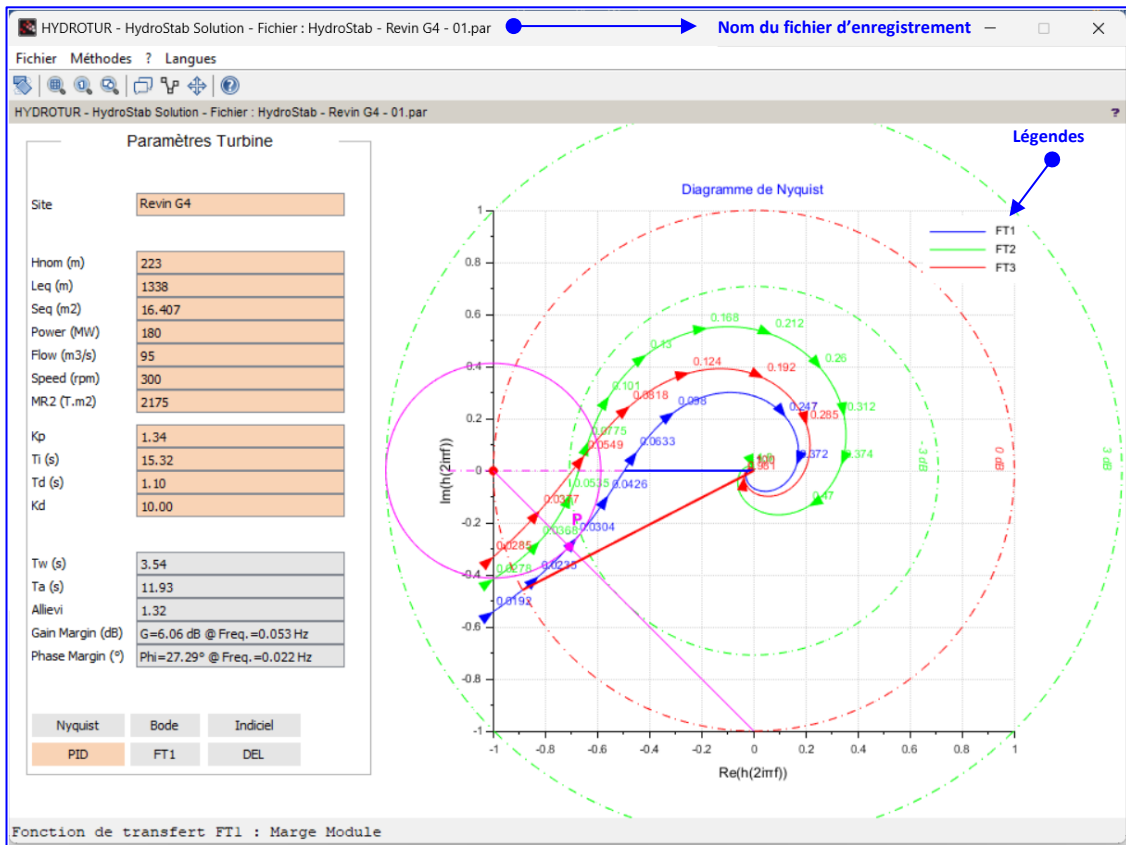




Figure 28 : Restitution d'un fichier de paramétrisation

 Note : le fichier source représentant la figure ci-dessus est indiqué en Annexe C

4.3.2.4 Fermeture d'une session HydroStab Solution « Fermer » ou

Une session de HydroStab solution se referme en activant le sous-menu, ou plus simplement en cliquant sur la croix  située en haut à droite de la fenêtre d'exécution.

Avant opération, HydroStab vérifie si la configuration initiale du travail en cours, a évoluée. Dans l'affirmative, une demande ultime de confirmation est demandée pour proposer un enregistrement de la session :

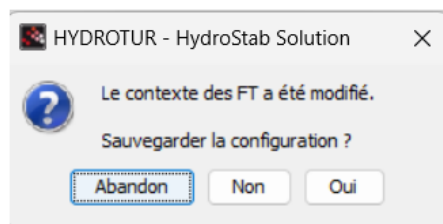


Figure 29 : Confirmation de fermeture d'une session HydroStab

4.3.3 Menu « Méthodes »

Le menu « Méthodes » propose de juxtaposer à la méthode principale de Marge de Module, des algorithmes bien connus, pour comparaison :

- Méthode de Ziegler-Nichols
- Méthode de Takahashi
- Marge de module réglée à -3dB pour comparaison de la marge de gain.

Leurs modes de fonctionnement sont indiqués dans la suite de ce document.

4.3.4 Menu ?

4.3.4.1 Menu *Commentaire*

Un commentaire correspond au texte affiché dans la zone « info_message » de l'écran principal (voir Figure 14)

Ce commentaire est initialisé suivant la méthode mise en œuvre par l'utilisateur, à chaque nouveau calcul introduisant le tracé d'une nouvelle fonction de transfert FT

Cinq attributs sont possibles, et automatiquement insérés par **HydroStab** :

- Marge de Module +3dB
- Ziegler-Nichols
- Takahashi
- User
- Marge de Module -3dB

Le menu *Commentaire* permet d'enrichir ce contenu en adjoignant des informations complémentaires, comme une variation du marnage, du débit, ou de toute autre condition particulière de l'essai (voir exemple en Annexe B).

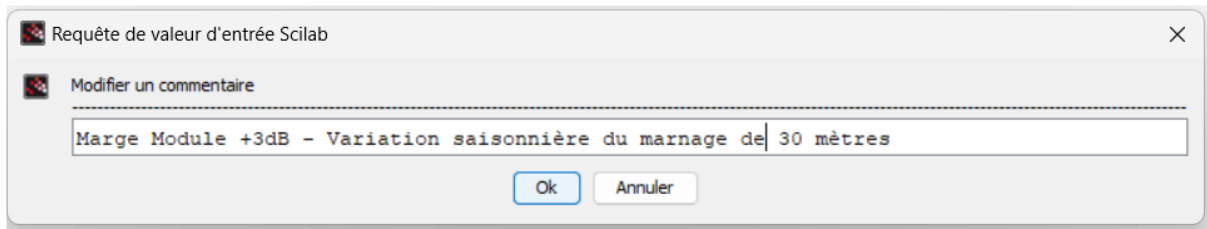


Figure 30 : Enrichissement d'un commentaire dans la présentation

4.3.4.2 Menu *Symétrie Nyquist*

Cette fonction, à alternance, rajoute ou enlève le tracé symétrique dans le diagramme de Nyquist :

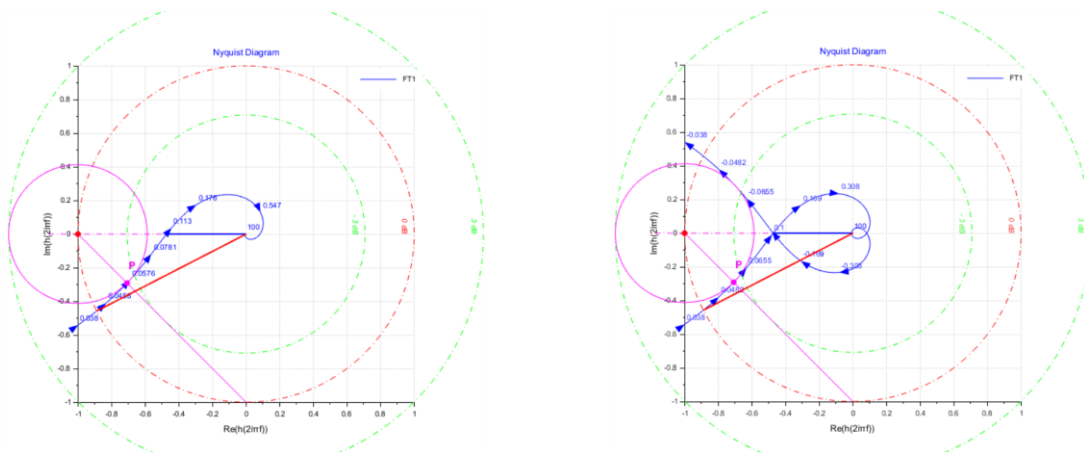


Figure 31 : Symétrie dans le plan de Nyquist

4.3.4.3 Menu Nyquist -3dB

Dans ce cas d'étude, le cercle de marge de module est tangent à la courbe -3dB

La marge de gain est réduite.

Cette étude, dans ce cas, est à comparer avec les méthodes de Ziegler-Nichols et Takahaschi proposées.

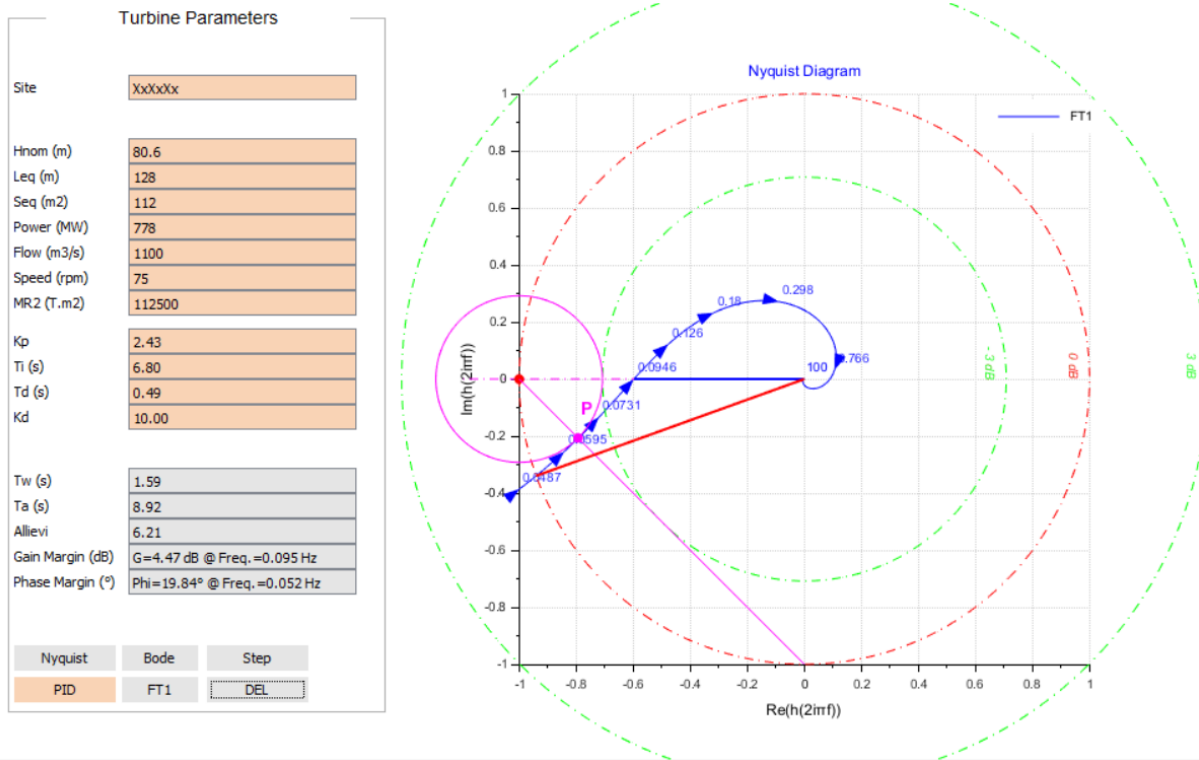


Figure 32 : Nyquist avec Marge de Module réglée à -3dB

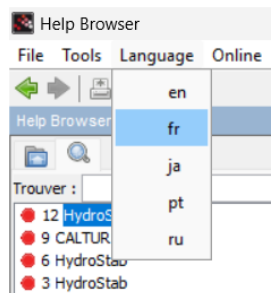
4.3.4.4 Menu « Aide en ligne »

Ce menu ouvre l'aide en ligne de HydroStab. L'aide en ligne peut aussi être lancée dans la console de SciLab en entrant la commande « **doc HydroStab** ».

L'aide en ligne est créée dans le répertoire HydroStab\help dans les fichiers au format « xlm ».

Puis, par recompilation du programme, un fichier « .JAR » est disponible pour réaliser l'aide en ligne Anglais/Français.

Lorsqu'une page d'aide est ouverte, il est possible de changer la langue d'affichage en utilisant le menu « Language »



4.3.4.5 Version de HydroStab

La version de HydroStab s'affiche dans la console Scilab lorsqu'on lance une session du programme.

Elle peut être également lue en utilisant le menu dans la barre d'outils HydroStab « **About HydroStab Solution** » :

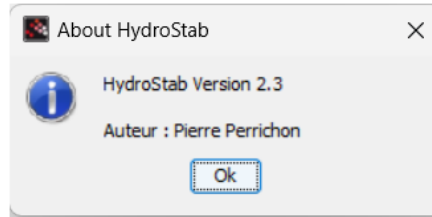


Figure 33 : Version de HydroStab

4.3.4.6 Version de Scilab

La version de Scilab utilisée est ici rappelée

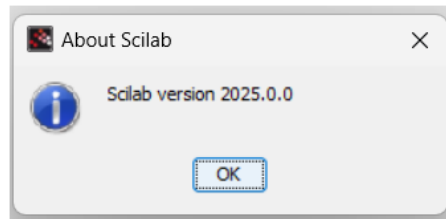


Figure 34 : Version de Scilab

Cette version peut être téléchargée sur le site

<https://www.scilab.org/>

5 REPERTOIRE DES MODELES XCOS

Les calculs établis dans HydroStab s'appuient sur des représentations graphiques des éléments à considérer, réalisées à l'aide de l'éditeur de schémas XCOS.

Par anticipation, ces modèles basiques sont conformes à la présentation générale faite en Figure 41.

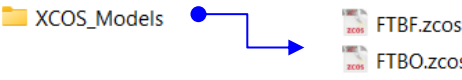


Figure 35 : Modèles XCOS – Listing des modèles

Les fonctions de transfert indiquées ci-dessous, citées à titre d'exemple, se réfèrent aux paramètres de l'usine de Revin Groupe 4 ; soit avec les paramètres calculés Tw, Ta et aut=0 (voir chapitre suivant)

5.1 Modèle réduit du procédé à régler

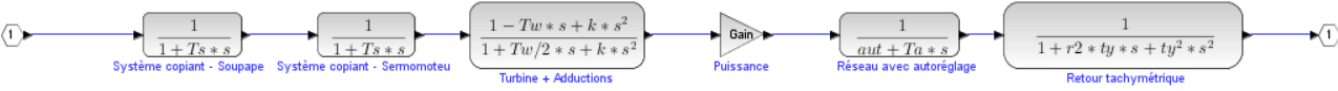


Figure 36 : Modèle réduit du procédé à régler

- Fonction de transfert du procédé à régler PROCESS – Représentation polynomiale⁸:

$$\frac{183.7201 - 650.36916s + 134.11567s^2}{2191.7808s^2 + 5285.3071s^3 + 4402.2498s^4 + 1612.1848s^5 + 284.19404s^6 + 24.566793s^7 + s^8}$$

5.2 Modèle de commande du procédé en boucle ouverte FTBO

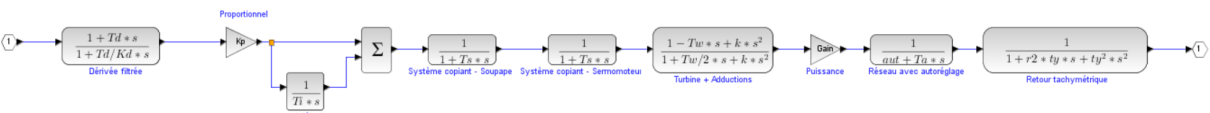


Figure 37 : Modèle FTBO de commande du procédé en boucle fermée

Remarque : la simulation du procédé est obtenue directement à partir de la FTBO en débrayant le PID vitesse, soit : $Kp=1, Td=0s, \text{ et } Ti=1.e10s$

- Fonction de transfert en boucle ouverte FTBO – Représentation polynomiale⁸:

$$\frac{146.08648 + 1881.5939s - 5923.0471s^2 - 6963.8666s^3 + 1797.15s^4}{19925.28s^2 + 50240.027s^3 + 45305.76s^4 + 19058.475s^5 + 4195.767s^6 + 507.52853s^7 + 33.657702s^8 + s^9}$$

⁸ Les fonctions de transfert sont données à titre indicatif, pour une paramétrisation définies dans l'étude du site de Revin par la fonction de transfert FT1

5.3 Modèle de commande du procédé en boucle fermée FTBF FTBF.zcos

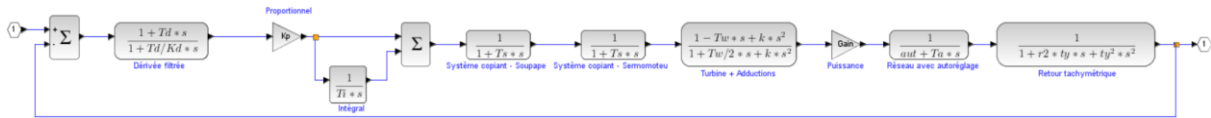


Figure 38 : Modèle FTBF de commande du procédé en boucle fermée

- Fonction de transfert en boucle fermée FTBF – Représentation polynomiale⁸ :

$$\frac{292.17296 + 3763.1877s + 8079.1859s^2 + 36312.294s^3 + 48900.06s^4 + 19058.475s^5 + 4195.767s^6 + 507.52853s^7 + 33.657702s^8 + s^9}{19925.28s^2 + 50240.027s^3 + 45305.76s^4 + 19058.475s^5 + 4195.767s^6 + 507.52853s^7 + 33.657702s^8 + s^9}$$

5.4 Utilisation dans le programme HydroStab

Les données « FTBO », « FTBF » sont des variables globales, et accessibles à tout instant dans la console Scilab :

- FTBO est représentée sous sa forme polynomiale en s (*Entrez FTBO*)
- FTBF est représentée sous sa forme d'état matricielle (A, B, C, D) dans l'espace d'état (*state-space*). (*Entrez FTBF*)

6 ELEMENTS DE CALCUL POUR LA DETERMINATION DES PARAMETRES DE STABILITE DU REGULATEUR DE VITESSE

6.1 Introduction

Tout projet comporte une phase d'étude de stabilité du groupe hydraulique. Il est donc ici nécessaire de rappeler le contexte du régulateur de vitesse à partir des éléments essentiels caractérisant une centrale hydraulique.

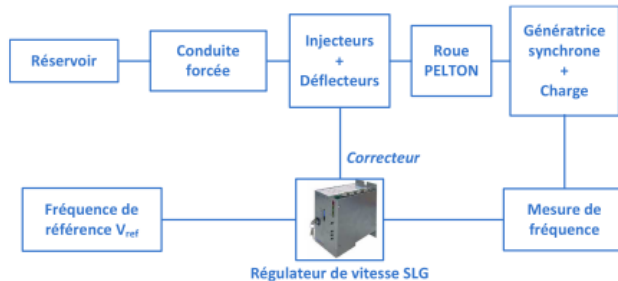


Figure 39 : Diagramme bloc d'un groupe hydraulique PELTON

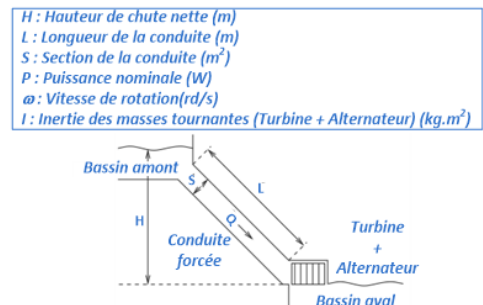


Figure 40 : Données d'entrées d'une étude de stabilité

Deux phases principales d'approche garantissent a priori la maîtrise de l'ouvrage. Ces deux phases sont complémentaires :

- Hydraulique**

Compte tenu des coups de bélier et des phénomènes d'ondes dans la conduite forcée, provoqués par la fermeture brusque d'une vanne (distributeur d'une turbine FRANCIS ou KAPLAN, ou injecteurs d'une machine PELTON), une étude des transitoires hydrauliques détermine des temps de manœuvre d'ouverture et de fermeture des organes de réglage, afin de minimiser la surpression générée dans la conduite, suite à un délestage, ou un arrêt d'urgence du groupe.

Cette étude est conduite par les experts hydrauliciens, spécialistes en Mécanique des Fluides.

Ces temps de manœuvres sont contrôlés par des réducteurs de débit dans le circuit oléohydraulique, et conditionnent ainsi le débit d'huile admis dans les chambres des servomoteurs. Malheureusement, il en résulte une augmentation de la survitesse mesurée sur la machine.

L'étude experte apporte ainsi le meilleur compromis entre la surpression et la survitesse en déterminant une loi oléohydraulique de fermeture à double pente, le cas échéant, et garantit les conditions de sûreté de l'ouvrage, sans rupture du conduit, ni emballement de la machine. **Le régulateur n'est donc pas un organe de sécurité.**

- Oléohydraulique**

L'annexe D rappelle le rôle du régulateur de vitesse dans la chaîne de commande oléohydraulique.

Le positionneur du régulateur commande en effet le ou les servomoteurs d'admission en eau sur la roue hydraulique par l'intermédiaire d'actionneurs.

- **Électrique**

L'étude de stabilité électrique a pour objets :

- ✓ de déterminer le quadruplet optimal $[K_p, T_i, T_d, K_d]$ du régulateur de vitesse du groupe couplé à un réseau électrique isolé ($aut=0$)
- ✓ de caractériser la réponse du groupe à des variations de charge sur le réseau.
- ✓ de fournir les paramètres de régulation au personnel de mise en service et à l'exploitant, afin de minimiser le temps d'optimisation sur le site, donc du volume d'eau utile à engager. Cette opération n'est, en effet, pas toujours possible ou facile à réaliser.

6.1.1 Étude de stabilité du groupe

On considère que l'ensemble « Conduite / Turbine / Alternateur » est assimilable à l'ensemble « Conduite / Orifice / Masses tournantes ».

Deux paramètres fondamentaux sont utilisés pour modéliser le système représenté en Figure 39, à partir des données d'entrées (H, L, S, P, ω, I) définies en Figure 40.

- ✓ Le temps de lancer mécanique T_a (ou inertie spécifique du groupe), est le temps nécessaire pour faire passer les masses en rotation Turbine+Alternateur de la vitesse nulle à la vitesse de rotation :

$$T_a = \frac{I \cdot \omega^2}{W} \text{ seconde}(s) \quad (3.1)$$

Ce temps se justifie à partir de l'équation fondamentale de la mécanique⁹ $I \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r$

- ✓ Le temps de lancer hydraulique est le temps caractéristique de la conduite débitant à la vitesse $V = \frac{Q}{S}$ que met l'eau partant du repos pour atteindre cette vitesse¹⁰ :

$$T_w = \frac{L \cdot Q}{g \cdot H \cdot S} \text{ seconde}(s) \quad (3.2)$$

, où g est l'accélération de la pesanteur exprimée en $m \cdot s^{-2}$.

En notant la **puissance hydraulique** du groupe $W = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q$, soit $Q = \frac{W}{\rho \cdot g \cdot H}$ ¹², et en réinjectant la valeur du **débit hydraulique** Q dans (3.2), on obtient aussi :

$$T_w = \frac{L \cdot W}{\rho \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot S} \text{ seconde}(s) \quad (3.3)$$

, où ρ désigne la masse volumique de l'eau, en kg/m^3

- ✓ D'autre part, et à titre informatif, le coefficient significatif d'Allievi permet de connaître le type d'oscillations engendré dans la conduite. Ce coefficient n'intervient pas dans les calculs :

$$Allievi = \frac{Q \cdot a}{2 \cdot g \cdot H \cdot S} \quad (3.4)$$

⁹ [6] Turbines hydrauliques et leur régulation - page 403

¹⁰ [6] Turbines hydrauliques et leur régulation - page 450

¹¹ Cette formule est utilisée dans la fiche de calcul Excel « CALCUR »

¹² Cette formule est utilisée dans la fiche de calcul Excel « CALCUR »

¹³ Cette formule de T_w est utilisée dans le script « SolveurHydroStab.sci »

a est le coefficient de célérité de l'onde d'eau (m/s)

Si $Allievi > 1$, le coup de bélier engendré par la fermeture brusque d'une vanne est dit « de masse ».

Si $Allievi < 1$, le coup de bélier engendré par la fermeture brusque d'une vanne est dit « d'onde ».

6.2 Étude en petits mouvements

Les simplifications en petits mouvements des équations analytiques du procédé¹⁴ amènent à modéliser le groupe hydraulique par le système réduit :

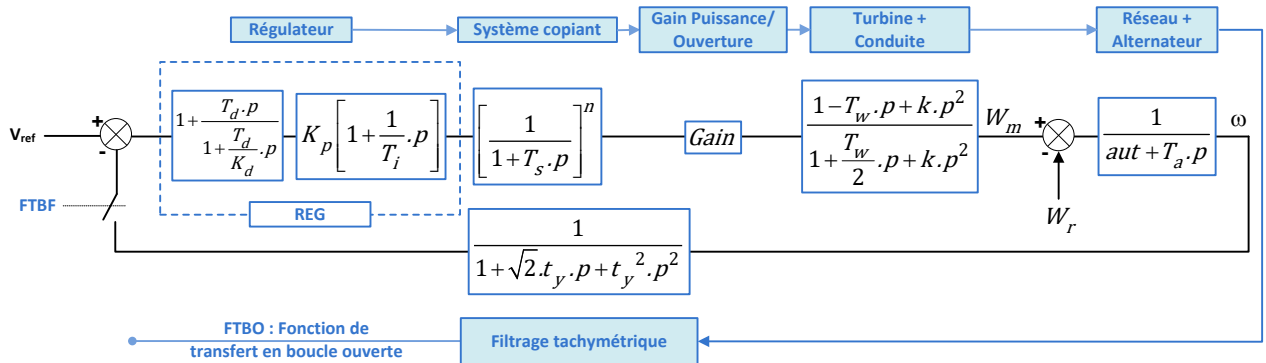


Figure 41 : Circuit de calcul simplifié de modélisation d'un groupe hydraulique

Les paramètres de régulation vont donc être calculés sur cette base. Nous admettrons donc le circuit de calcul présenté en Figure 41, et on s'intéresse dans un premier temps au système représenté par la fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO).

Notations complémentaires, hypothèses, et commentaires

Régulateur

- Une structure détaillée du régulateur de vitesse dans le circuit final est aussi présentée en Annexe E.2 - Régulateur de vitesse pour turbines FRANCIS
- Le régulateur modélisé est astatique, soit $B_p = 0$, ce qui est le cas le plus défavorable.

Système copiant

Simplification :

- $n=1$ Régulateur de position simple étage. Le régulateur pilote directement une servovalve proportionnelle.
- $n=2$ Régulateur de position double étage. L'actionneur (soupape), commandé par le régulateur, pilote le distributeur principal (voir schéma de principe en Annexe D, Figure 80).

Cette simplification n'est valable qu'en petits mouvements, soit pour de faibles variations de charge, et pour des mouvements de servomoteur n'atteignant pas les temps de manœuvre hydromécaniques.

Dans les calculs, nous adoptons $n=2$ et $T_s = 0.25 \text{ s}$

Gain Puissance/Ouverture

$G=1$. Ici, le modèle ne tient pas compte de la loi de linéarisation Puissance/Ouverture

Turbine + Conduite

k est déterminé pour prendre en compte le coup de bélier d'onde dans la

conduite : $k = \left(\frac{2.L}{\pi.a} \right)^2$

¹⁴ Voir [6] Deuxième Partie : Régulation de vitesse des turbines hydrauliques

a est le coefficient de célérité. Il représente la vitesse de propagation des ondes de coup de bélier d'eau dans la conduite¹⁵, exprimée en m/s. Pour un orifice de 1 mètre de diamètre avec une conduite de 1 cm d'épaisseur $a = 1000 \text{ m/s}$. Cette valeur est portée dans les calculs.

Réseau + Alternateur

aut est le coefficient d'autorégulation du réseau, parfois appelé « statisme réseau ».

Lorsque la turbine alimente un réseau purement résistif, le couple électrique diminue lorsque la vitesse du groupe augmente ($aut = 0$). Lorsque $aut = 1$, le couple électrique est indépendant de la fréquence, la puissance croît avec la vitesse du groupe.

Dans les calculs, nous adoptons $aut = 0$, ce qui est le cas le plus défavorable.

→ Noter que la simulation avec $aut = 0$ fait que le procédé comporte déjà un intégrateur pur.

Tachymètre

t_y est la constante du module tachymétrique. Dans les calculs, $t_y = 0.1 \text{ s}$

7 METHODES D'OPTIMISATION

7.1 Méthode de la Marge de Module

7.1.1 Critère de stabilité dans le plan de Nyquist

Le diagramme de Nyquist consiste à tracer la fonction de transfert indiquée en Figure 41 dans le plan complexe. Son désavantage par rapport au diagramme de Bode est que la connaissance explicite de la fréquence est perdue. Néanmoins, ce tracé permet de définir un critère de stabilité connu sous le nom de critère de Nyquist en boucle ouverte :

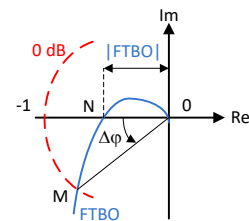


Figure 42 : Plan de Nyquist



Si la fonction de transfert FTBO d'un système asservi ne possède aucun pôle à partie réelle positive, alors ce système est stable en boucle fermée si, en décrivant le lieu de Nyquist en boucle ouverte FTBO dans le sens des fréquences croissantes, un observateur voit le point critique (-1,0) à sa gauche.

À l'aide de ce critère, les marges de stabilité peuvent être définies (Figure 43) :

- La **Marge de gain** est définie comme étant l'inverse du gain du système à la pulsation ω_π où la phase du système en boucle ouverte FTBO atteint -180° . Elle correspond sur la Figure 42 au point N, et est exprimée en général en dB : $Marge\ de\ Gain = -20 \log(|ON|) = (-20 \log(|FTBO|))$. La **Fréquence critique** f_π est la fréquence où la phase passe en dessous de 180° .
- La **Marge de phase** représente la différence entre la phase du système FTBO considéré et -180° à la pulsation de coupure ω_c , soit la pulsation pour laquelle le module est égal à 0 dB : $Marge\ de\ Phase = arg[FTBO] - (-180^\circ)$. Elle est aussi définie par le point M correspondant à l'intersection du lieu de Nyquist de FTBO avec le cercle unité centré à l'origine et de rayon unité (Figure 42).

Le logiciel **HydroStab** calcule les valeurs de réglage *a priori* des paramètres d'asservissement du régulateur de vitesse en petits mouvements, en imposant une distance minimale entre le lieu de Nyquist et le point critique. Cette distance s'appelle aussi **Marge de module**.

¹⁵ La valeur de a est calculée par $\frac{1}{a^2} = \rho \left[\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D}{E.e} \right]$. Voir signification et explications en [6] page 434

Ce logiciel est ainsi basé sur une méthode fréquentielle, et n'est applicable que sur un système linéaire.

L'objectif est de contraindre la FTBO (régulateur + procédé) à passer par un point **P** imposé dans le plan de Nyquist

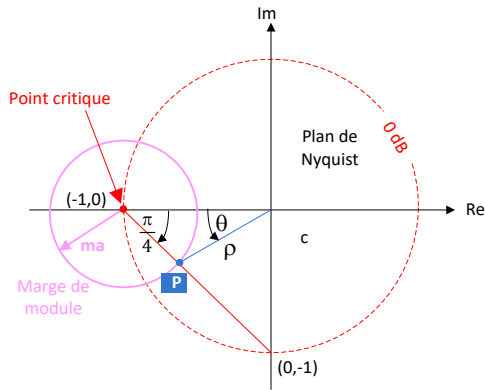


Figure 43 : Marge de module dans le plan de Nyquist

| | |
|-----------------|-----------------------------|
| Hnom (m) | 223 |
| Leq (m) | 1338 |
| Seq (m2) | 16.407 |
| Power (MW) | 180 |
| Flow (m3/s) | 95 |
| Speed (rpm) | 300 |
| MR2 (T.m2) | 2175 |
| Kp | 1.34 |
| Ti (s) | 15.32 |
| Td (s) | 1.10 |
| Kd | 10.00 |
| Tw (s) | 3.54 |
| Ta (s) | 11.93 |
| Allievi | 1.32 |
| Marge Gain (dB) | G=6.06 dB @ Freq.=0.053 Hz |
| Marge Phase (°) | Phi=27.29° @ Freq.=0.022 Hz |

Figure 44 : Données d'entrée et résultats de l'étude de stabilité en petits mouvements

ma désigne la marge de module, et est représenté par un cercle de rayon **ma** centré sur le point critique (-1,0).

Le point **P** visé indique l'intersection entre ce cercle et la droite passant par les points (-1,0) et (0,-1).

L'angle entre cette droite et l'axe Re égale $\frac{\pi}{4}$.

7.1.1.1 Principe

Le cercle de rayon **ma** est tangent au cercle de rayon +3 dB :

$$20 \cdot \log(1 + ma) = +3 \text{ dB}$$

$$ma = 10^{\frac{3}{20}} - 1$$

Soit

$$ma = 0.4125375$$

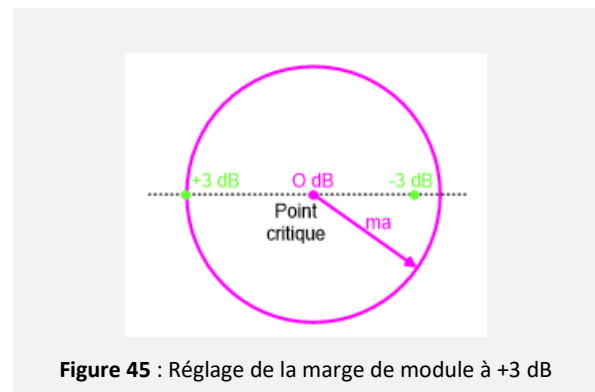
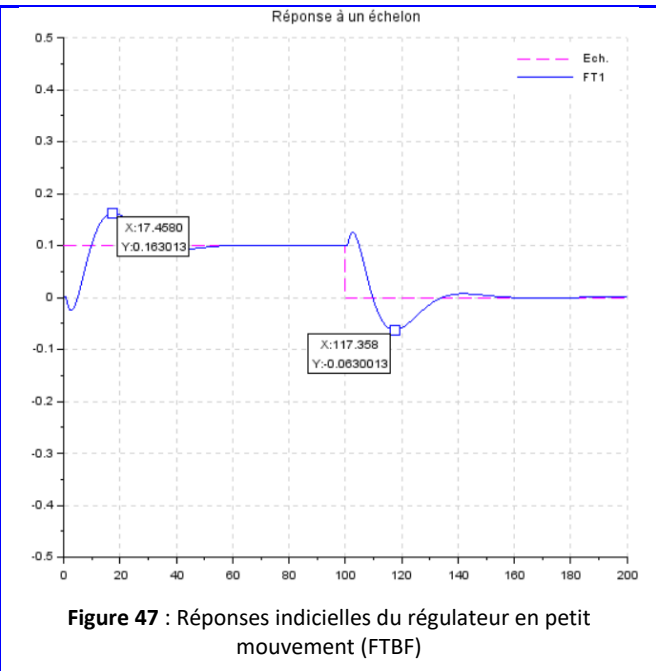
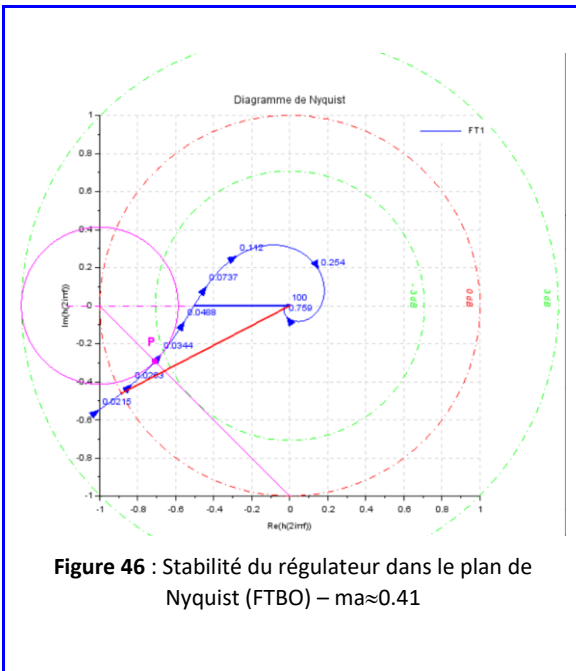


Figure 45 : Réglage de la marge de module à +3 dB

7.1.1.2 Résultats à +3 dB

| | | |
|------------------------------------|---|---------------------------------------|
| Marge de module $ma \approx 0.412$ | Angle action Intégrale $ai = -20^\circ$ | Angle action Dérivée $ad = +10^\circ$ |
|------------------------------------|---|---------------------------------------|



FT1 : $Kp=1.5100$ $Ti=13.6300$ $Td=0.9800$ s $Kd=10.0000$
 Marge de Gain $G=5.95$ dB @ Freq.=0.058 Hz Marge de Phase $\Phi=27.49^\circ$ @ Freq.=0.024 Hz

La Figure 46 montre que le circuit de calcul du logiciel HydroStab est bien conforme à son objectif avec une marge de module ma réglée à +3dB. Ainsi, le lieu de Nyquist du procédé en boucle ouverte est-il corrigé par le PID pour passer par le point P.

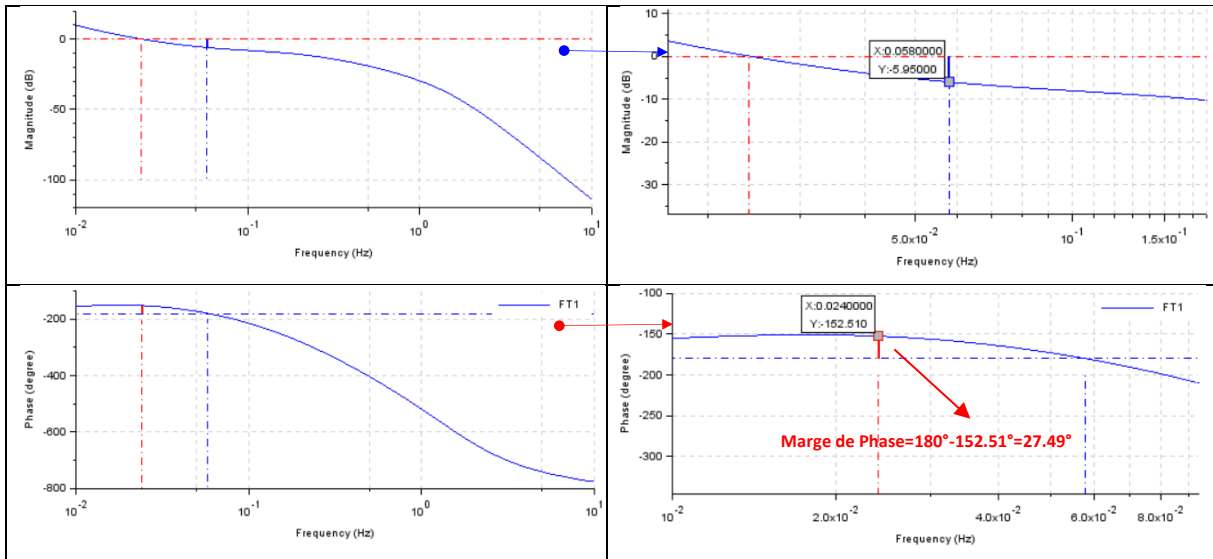


Figure 48 : Diagramme de Bode en boucle ouverte - Marges de gain et de phase – Réglage ma à +3dB

Comme le montre la Figure 48, la méthode de réglage des paramètres du PID établit des caractéristiques telles que :

- La marge de gain est environ de 6dB, c'est-à-dire qu'à la fréquence où le déphasage entre l'entrée et la sortie vaut -180° , le gain sortie/entrée vaut $10^{\frac{-6}{20}} \approx 0.5$

- La marge de phase est environ 27°, c'est-à-dire qu'à la fréquence où le gain sortie/entrée vaut 1 (0dB), le déphasage entre la sortie et l'entrée vaut -180°+27°≈-153°.

7.1.2 Réglage de la Marge de module à -3 dB

7.1.2.1 Principe

Le cercle de rayon *ma* est tangent au cercle de rayon -3 dB :

$$20.\log(1 - ma) = -3 \text{ dB}$$

$$ma = 1 - 10^{\frac{-3}{20}}$$

Soit

$$ma = 0.2920542$$

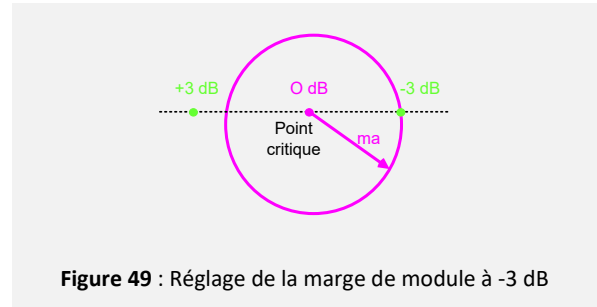


Figure 49 : Réglage de la marge de module à -3 dB

7.1.2.2 Résultats à -3 dB

| | | |
|----------------------------------|---|---------------------------------------|
| Marge de module <i>ma</i> ≈ 0.29 | Angle action Intégrale <i>ai</i> = -20° | Angle action Dérivée <i>ad</i> = +10° |
|----------------------------------|---|---------------------------------------|

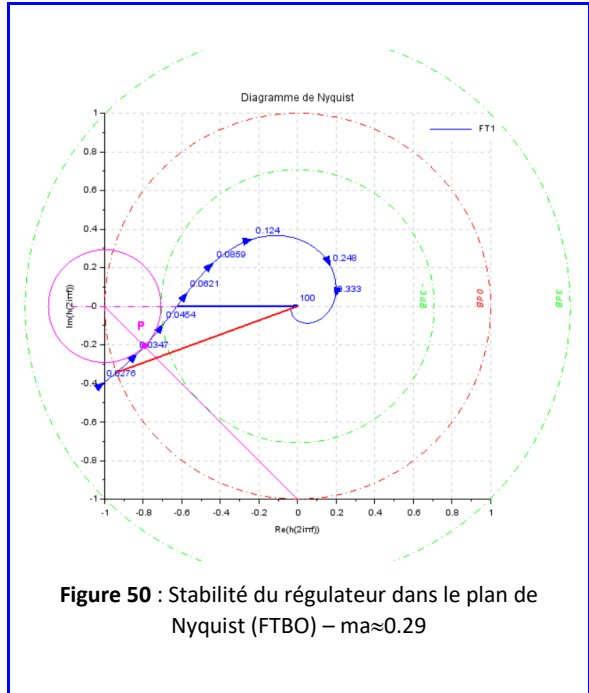


Figure 50 : Stabilité du régulateur dans le plan de Nyquist (FTBO) – *ma*≈0.29

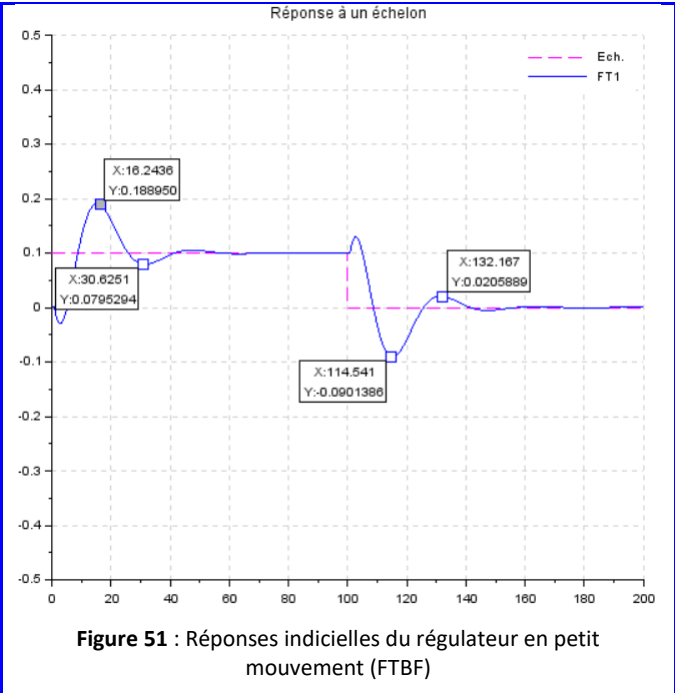


Figure 51 : Réponses indicielles du régulateur en petit mouvement (FTBF)

FT1 : $K_p=1.8000$ $T_i=11.8360$ s $T_d=0.8470$ s $K_d=10.0000$
 Marge de Gain $G=4.08$ dB @ Freq.=0.054 Hz Marge de Phase $\Phi=20.11^\circ$ @ Freq.=0.030 Hz

La Figure 50 montre que le circuit de calcul du logiciel HydroStab est bien conforme à son objectif avec une marge de module *ma* réglée à -3dB. Ainsi, le lieu de Nyquist du procédé en boucle ouverte est-il corrigé par le PID pour passer par le point P.

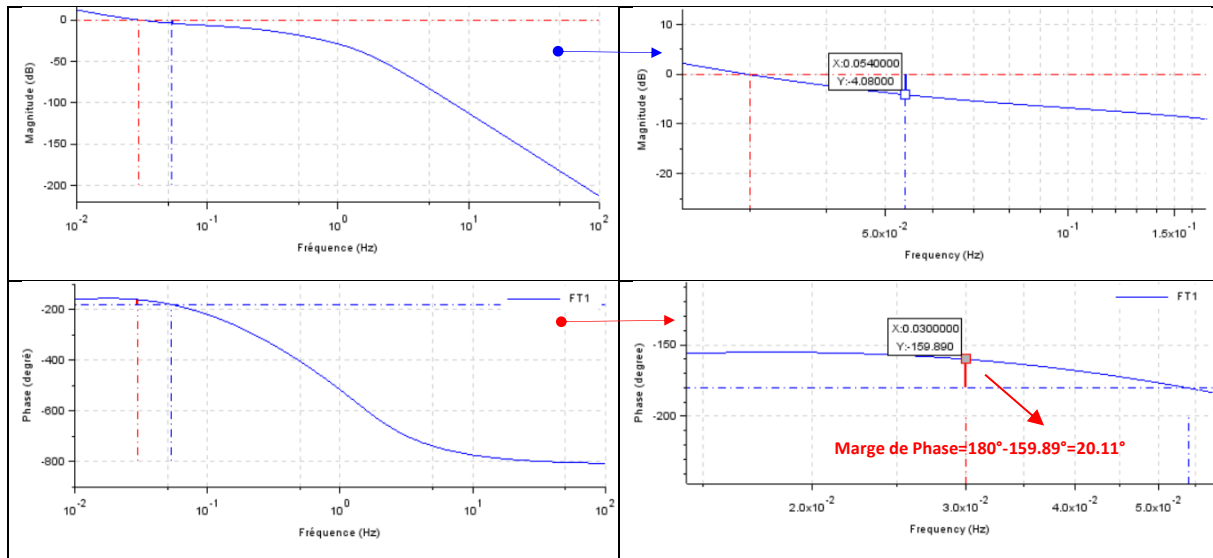


Figure 52 : Diagramme de Bode en boucle ouverte - Marges de gain et de phase – Réglage *ma* à -3dB

Comme le montre la *Figure 52*, la méthode de réglage des paramètres du PID établit des caractéristiques telles que :

- La marge de gain est environ de 4dB, c'est-à-dire qu'à la fréquence où le déphasage entre l'entrée et la sortie vaut -180° , le gain sortie/entrée vaut -4dB , soit $10^{\frac{-4}{20}} \approx 0.63$
- La marge de phase est environ 20° , c'est-à-dire qu'à la fréquence où le gain sortie/entrée vaut 1 (0dB), le déphasage entre la sortie et l'entrée vaut $-180^\circ + 20^\circ \approx -160^\circ$.

7.2 Méthode de Ziegler-Nichols

7.2.1 Principe de la méthode

La méthode de Ziegler-Nichols permet d'ajuster les paramètres du régulateur pilotant le processus PROCESS¹⁶.

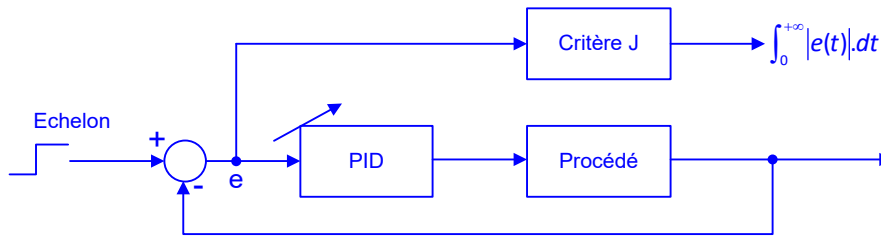


Figure 53 : Principe de la méthode de Ziegler-Nichols

En simulant la boucle de la Figure 53 pour divers modèles, Ziegler & Nichols (ZN) ont recherché les paramètres des régulateurs PI, PD, PID minimisant le critère J :

$$J = \int_0^{+\infty} |e(t)| dt \quad (3.5)$$

, lors d'une variation indicielle de la consigne, le système étant en régime établi à l'instant t=0.

La méthode utilisée est dite « Limite de pompage » :

- Le procédé étant bouclé par un régulateur à action proportionnelle uniquement, on augmente le gain critique K_{cr} jusqu'à ce que des oscillations entretenues apparaissent (phénomène de pompage).

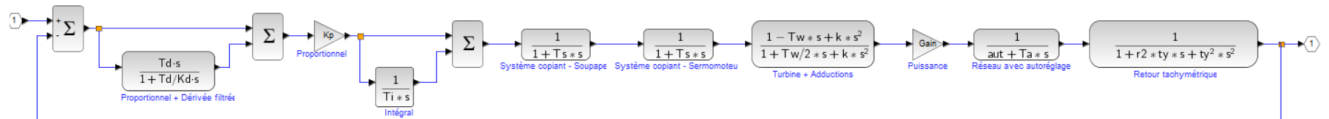


Figure 54 : PID en boucle fermée « FTBF.zcos » pour application de la méthode Ziegler-Nichols

7.2.2 Mise en œuvre de la méthode

7.2.2.1 Sélection des modes Manuel ou Automatique pour la mise en œuvre

Le fichier « [HydroStab.par](#) » contient les paramètres suivants, permettant le réglage des méthodes de Ziegler-Nichols, ou Takahashi :

| Paramètres | Signification |
|------------|--|
| Auto_ZN | Recherche automatique ou manuelle du gain critique K_{cr} dans les méthodes de Ziegler-Nichols ou Takahashi (%t ou %f) |
| Trace_ZN | Permet l'affichage dans la console des itérations de la recherche automatique (%t ou %f) |
| ZN_Datatip | Affichage (1) ou non (0) des datatips de la période d'oscillation Tosc |

Figure 55 : Choix des paramètres d'optimisation pour les méthodes Ziegler-Nichols ou Takahashi

7.2.2.2 Activation en mode manuel

La méthode est activée en sélectionnant « **Ziegler-Nichols** » dans la barre de menu principale de HydroStab :

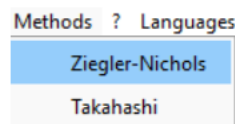


Figure 56 : Activation de la méthode de Ziegler-Nichols

¹⁶ Voir [9]

La méthode de recherche se divise en une étape 1 de réglage manuel du gain critique K_{cr} , sous la responsabilité de l'opérateur, et une étape 2 de validation des résultats du PID calculé.

7.2.2.3 Initialisation et paramétrage

Les paramètres du modèle ZN sont initialisés, par défaut, avec les valeurs $T_i=1.e+4$ s, $T_d=0$ s, et $K_d=10$. Ces valeurs inhibent l'action Intégrale et l'action dérivée.

Le gain critique K_{cr} est initialisé avec l'inverse du coefficient d'optimisation, appliqué à la valeur du K_p en cours :

$$K_{cr} = K_p / 0.6 \quad (3.6)$$

Les autres constantes T_s , T_w , k , Gain, aut, T_a , r_2 , t_y sont identiques à celles correspondant à la simulation de la fonction de transfert en cours dans HydroStab. Le numéro de cette fonction est celui indiqué sur la touche FTx **FT1**.

7.2.2.4 Réglage du gain critique **Kcr** - Validation des calculs **Validation**

Au lancement de la procédure, une première simulation est réalisée avec les paramètres d'entrée précisés ci-dessus.

Un oscilloscope numérique permet de contrôler la réponse indicielle du procédé, rebouclé par son correcteur PID ; une boîte à message indique les opérations à suivre

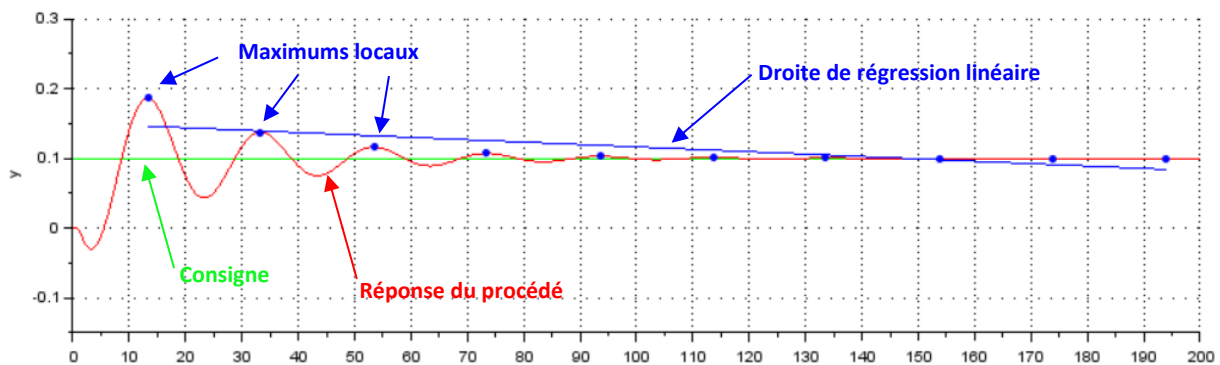


Figure 57 : Scope Ziegler-Nichols avec droite de régression linéaire et maximums locaux

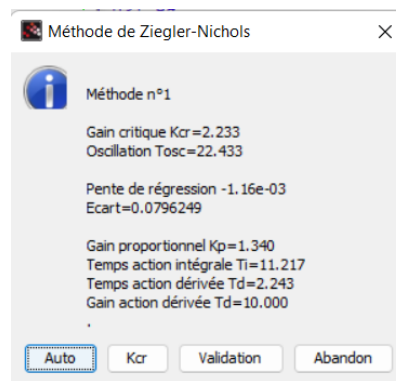


Figure 58 : Boîte de dialogue Ziegler-Nichols

Le scope visualise :

- L'échelon de consigne appliquée au temps $t=0$
- La réponse indicielle du processus
- Les maximums locaux $T_{Max}(i)$ de la réponse (●)
- La droite de régression linéaire au sens des moindres carrés définie par l'ensemble des points $Max(i)$


La période des oscillations est automatiquement calculée par HydroStab, en considérant la moyenne des intervalles de temps enregistrés :

$$T_{osc} = \left(\sum_{i=1}^{N-1} tMax(i+1) - tMax(i) \right) / (N-1) \quad (3.7)$$

La boîte de dialogue « Ziegler-Nichols » fournit les informations suivantes :

- Le numéro de la méthode sélectionnée pour le calcul des paramètres du PID réglant

- Le gain K_{cr} relatif à l'estimation en cours, soit celui imposé par l'opérateur durant sa phase d'essai.
- La période estimée des oscillations, en respect de la formule (3.7)
- La pente de la droite de régression linéaire
- Les valeurs calculées du triplet de réglage [K_p, T_i, T_d], en conformité avec la méthode appliquée (Figure 62 : Proposition de réglage d'un PID suivant la méthode de Ziegler-Nichols – Méthode n°1)

Les différents essais de réglage sont conduits en cliquant sur le BP  ; dans ce cas, une boîte de saisie apparaît pour entrer la valeur du gain K_{cr} :

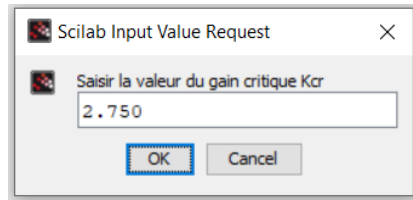
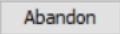
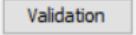




Figure 59 : Boîte de saisie du gain K_{cr}

Un clic sur le BP  termine immédiatement la session ZN pour retourner vers HydroStab.

Un clic sur le BP  provoque l'insertion de la nouvelle FT, si elle n'existe pas déjà, dans la liste des FT en cours.

Dans tous cas, HydroStab pointe sur la FT issue de ce calcul (ex : ). Sa représentation dans les plans de Nyquist ou de Bode, ou sa représentation indicielle sont donc disponibles sous HydroStab.

- Augmenter la valeur du gain critique K_{cr} de la boucle, en saisissant directement sa valeur après appui sur le bouton , jusqu'à obtenir une oscillation entretenue du Correcteur + Procédé.



Plus généralement, le gain K_{cr} doit être adapté en opposition à la pente de régression linéaire obtenue :

- Si la pente de la droite de régression est positive, diminuer la valeur de K_{cr}
- Si la pente de la droite de régression est négative, augmenter la valeur de K_{cr}

Figure 60 : Principe de réglage général du gain critique K_{cr} dans la méthode de Ziegler-Nichols

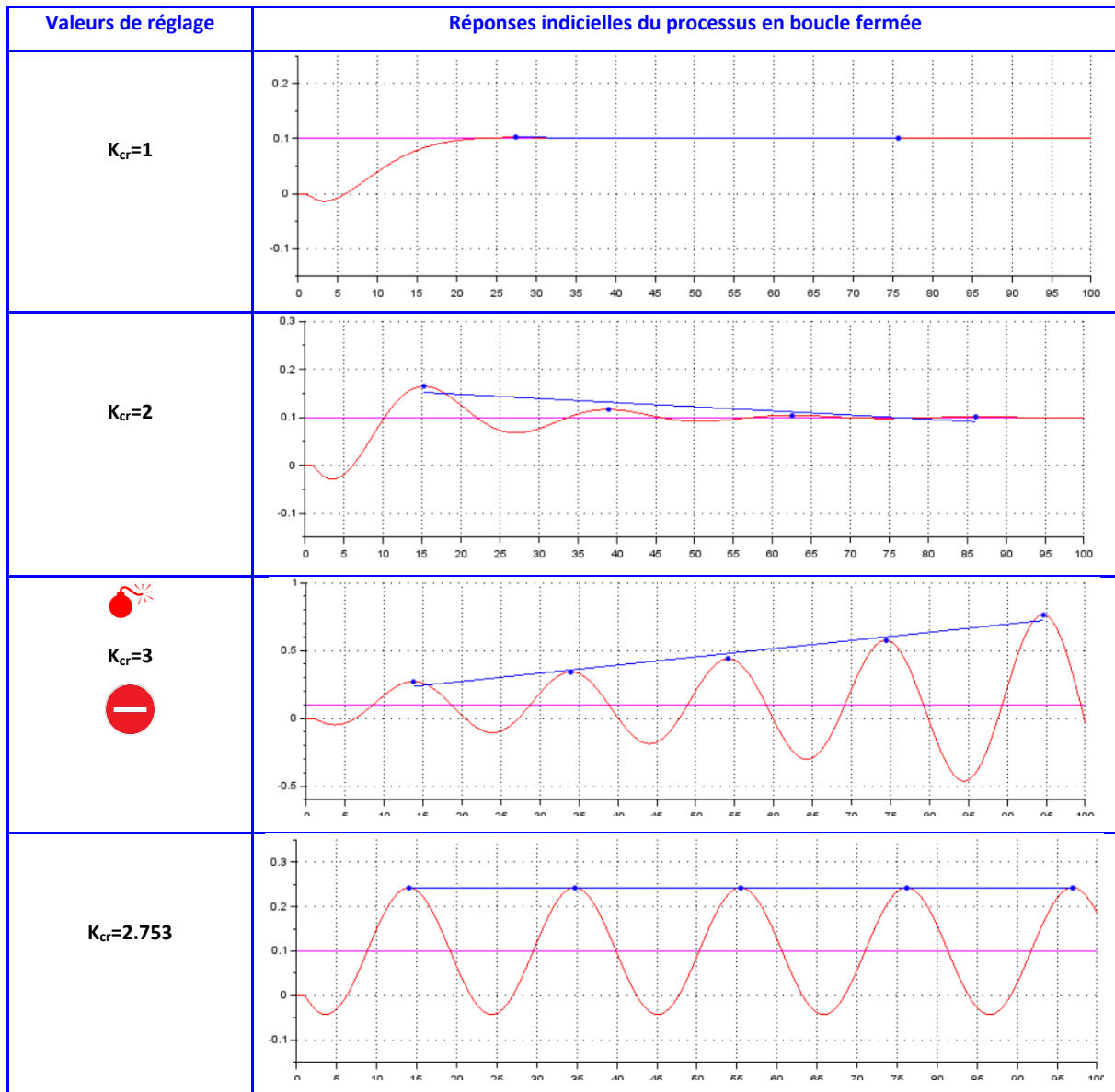


Figure 61 : Exemple de réglage du procédé de Ziegler-Nichols

7.2.2.5 Calculs

La méthode 1, préselectionnée dans le fichier « HydroStab.par » (**ZN_Methode=1**), est alors appliquée pour calculer les paramètres du régulateur de vitesse.

| Transmittance du régulateur | Valeurs des paramètres du régulateur suivant la méthode de Ziegler-Nichols | | |
|---|--|---------------------|---------------------|
| $PID = K_p \cdot (1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s)$ | $K_p = 0.6 K_{cr}$ | $T_i = 0.5 T_{osc}$ | $T_d = 0.1 T_{osc}$ |
| | | | $K_d = 10$ |

Figure 62 : Proposition de réglage d'un PID suivant la méthode de Ziegler-Nichols – Méthode n°1

On peut vérifier que l'on a bien la relation bien connue en limite de stabilité :

$$T_i \gg 4.T_d \quad (3.8)$$

7.2.2.6 Vérifications

En se référant aux exemples indiqués dans l'affaire Revin, et au fichier « *HydroStab - Revin G4 - 01.par* », on obtient ainsi le tracé dans le plan de Nyquist de la fonction de transfert FT2 :

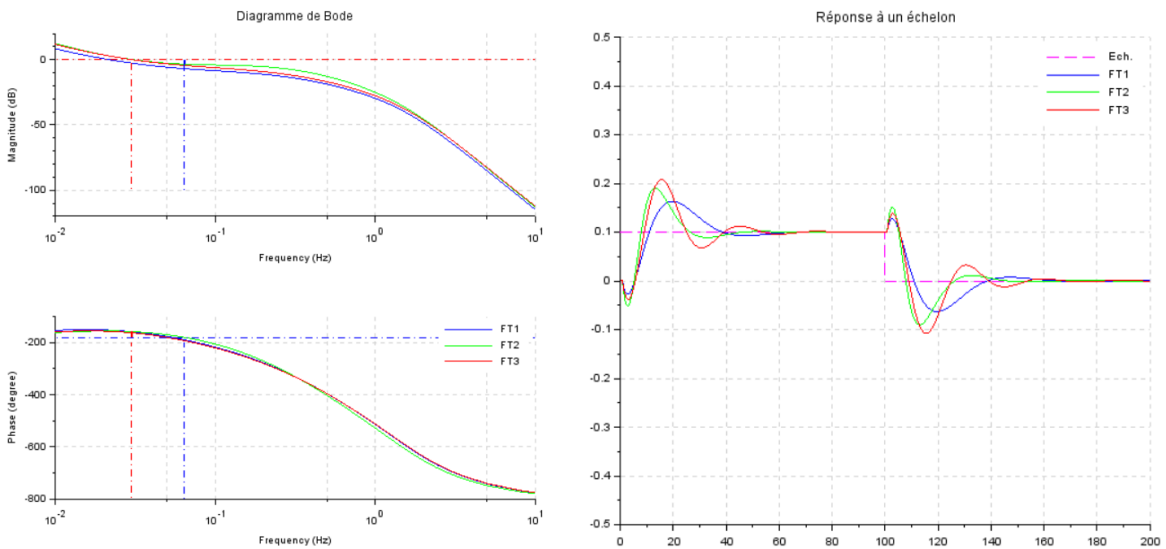
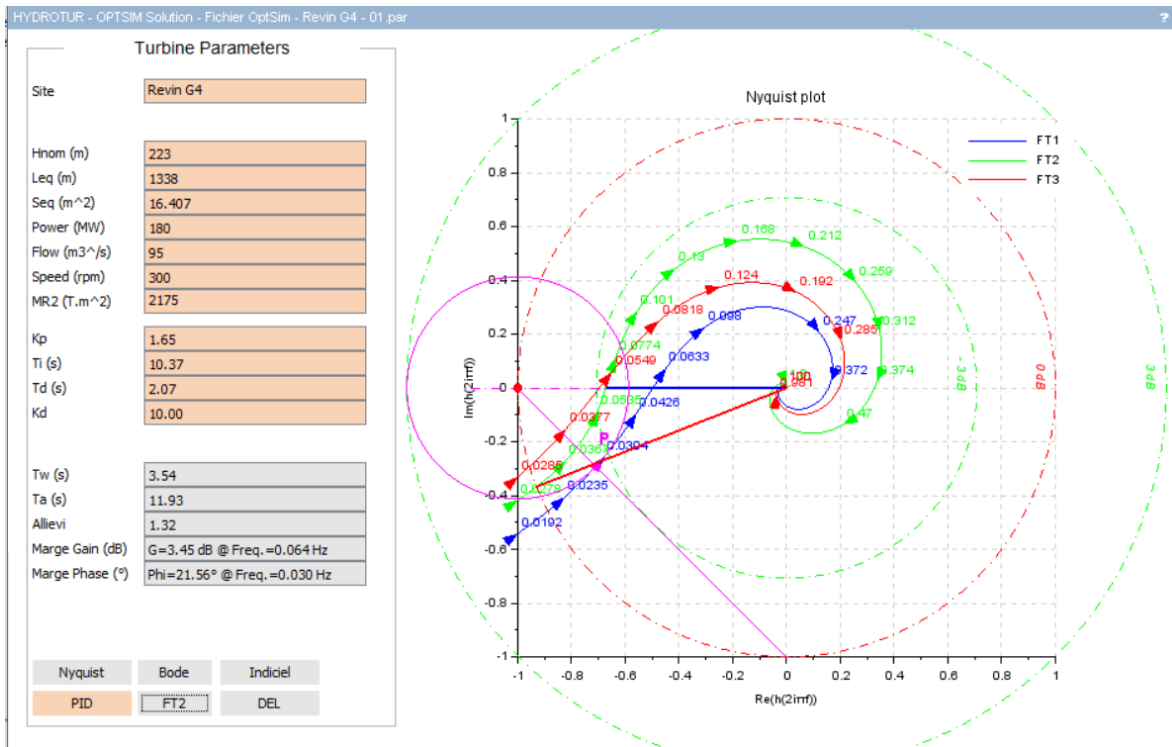


Figure 63 : Vérifications de la méthode de Ziegler-Nichols

Il est également possible de vérifier le gain critique K_{cr} obtenu par la méthode Ziegler-Nichols :

Pour ce faire, saisir, dans HydroStab, une nouvelle programmation avec les données $K_{cr}=2.75$, $T_i=1000$, et $T_d=0$ d'entrée :

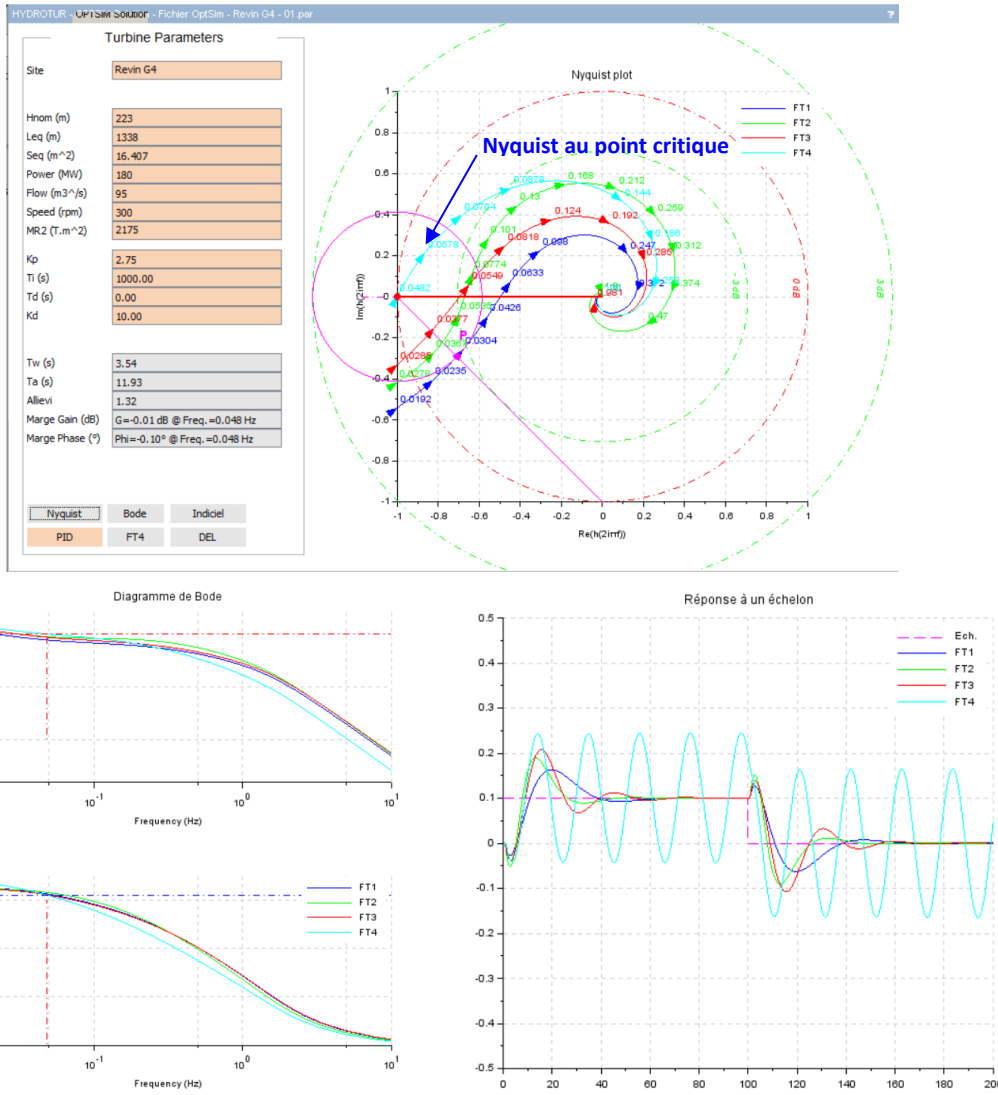


Figure 64 : Vérification du gain critique K_{cr} dans le plan de Nyquist

Le gain critique K_{cr} obtenu par la méthode ZN, correspond donc exactement au point critique (0, -1) ● indiqué dans le plan de Nyquist.

De même, on obtient une oscillation entretenue non divergente de la réponse indicelle.

- T_{osc} peut être vérifié en programmant l'option **ZN_Datatip=1**. Dans ce cas, les datatips des maximums $Max(i)$ sont automatiquement affichés, comme indiqué ci-dessous :

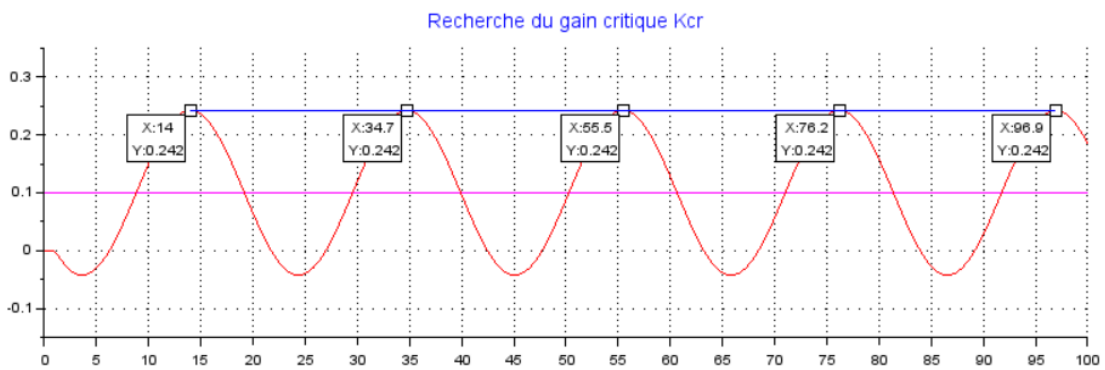


Figure 65 : Vérification de la période des oscillations T_{osc} dans la méthode de Ziegler-Nichols

7.2.2.7 Activation en mode Automatique

La recherche automatique du gain critique Kcr est réalisée :

- soit en programmant le paramètre Auto_ZN=%t dans le fichier « [HydroStab.par](#) »
- soit en activant le bouton Auto dans la fenêtre d'affichage du gain Kcr (voir [Figure 58](#))

Dans ces conditions, HydroStab recherche automatiquement la valeur du gain Kcr par une suite d'itérations à pas variable, afin de déterminer une valeur précise du gain au 1/1000 ième.

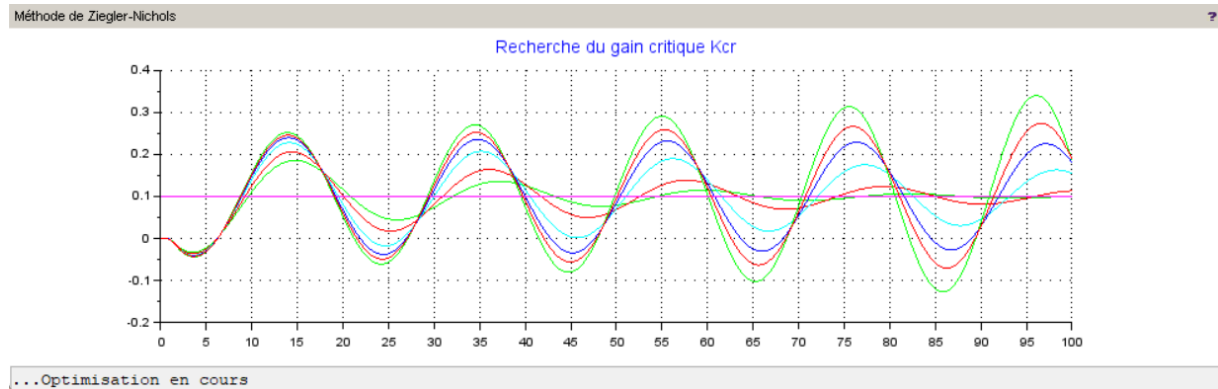


Figure 66 : Phase active de recherche automatique du gain critique Kcr

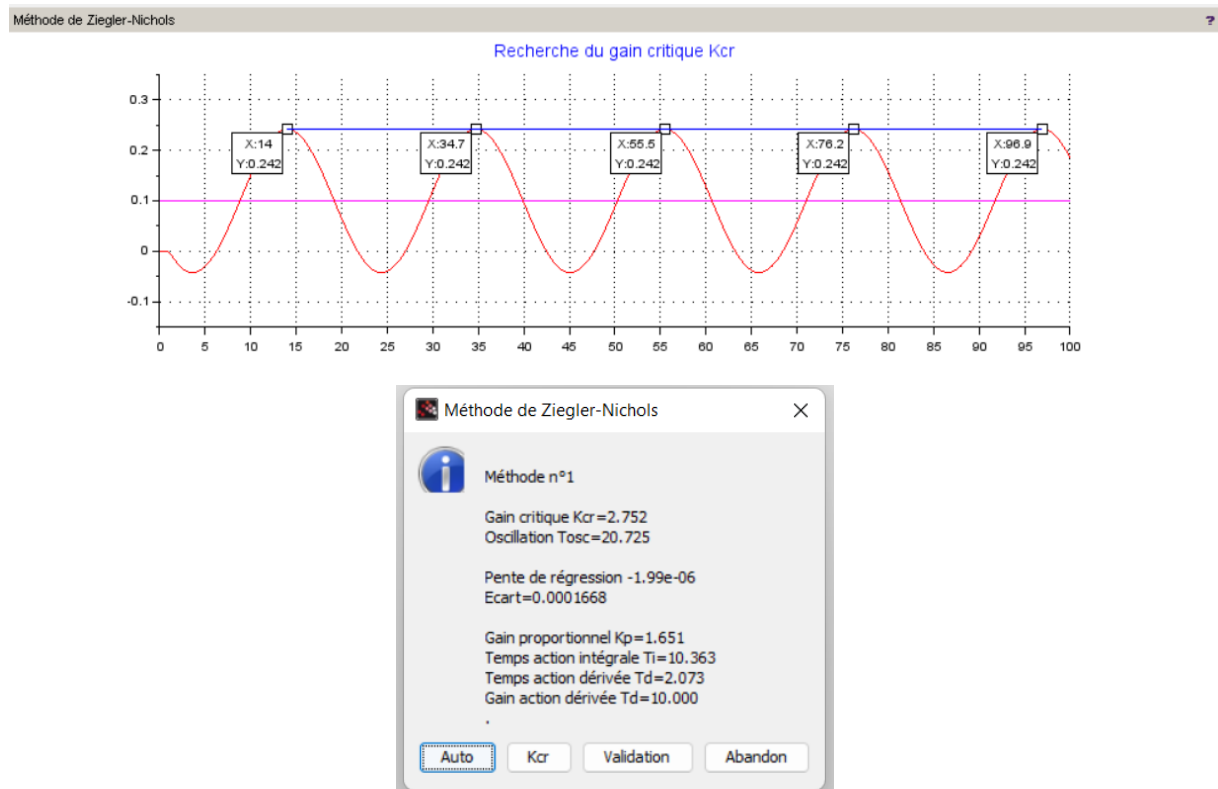


Figure 67 : Phase terminale de recherche du gain critique Kcr

7.2.2.8 Option de traçage Trace_ZN dans la recherche automatique du gain critique Kcr

L'option de traçage **Trace_ZN** de l'algorithme de recherche automatique permet l'affichage, dans la console Scilab, de l'ensemble des itérations réalisées :

```

Itération=01 Kcr=2.763 M_Kcr=0.000000 Pente= 0.0001136 M_Pente= 0.0001136 Ecart=-0.0094079 Incrément=0.2000
Itération=02 Kcr=2.563 M_Kcr=2.763272 Pente=-0.0009550 M_Pente= 0.0001136 Ecart= 0.0818277 Incrément=0.2000
Itération=03 Kcr=2.663 M_Kcr=2.763272 Pente=-0.0006382 M_Pente= 0.0001136 Ecart= 0.0535999 Incrément=0.1000
Itération=04 Kcr=2.713 M_Kcr=2.763272 Pente=-0.0003336 M_Pente= 0.0001136 Ecart= 0.0278190 Incrément=0.0500
Itération=05 Kcr=2.753 M_Kcr=2.763272 Pente= 0.0000106 M_Pente= 0.0001136 Ecart=-0.0008798 Incrément=0.0100
Itération=06 Kcr=2.743 M_Kcr=2.753272 Pente=-0.0000852 M_Pente= 0.0000106 Ecart= 0.0070762 Incrément=0.0100
Itération=07 Kcr=2.748 M_Kcr=2.753272 Pente=-0.0000382 M_Pente= 0.0000106 Ecart= 0.0031727 Incrément=0.0050
Itération=08 Kcr=2.752 M_Kcr=2.753272 Pente= 0.0000007 M_Pente= 0.0000106 Ecart=-0.0000566 Incrément=0.0010
Itération=09 Kcr=2.751 M_Kcr=2.752272 Pente=-0.0000092 M_Pente= 0.0000007 Ecart= 0.0007625 Incrément=0.0010
    
```

Figure 68 : Option de traçage Trace_ZN

7.2.3 Comparaison des méthodes de Marge de Module et Ziegler-Nichols

7.2.3.1 Comparaison des méthodes dans le plan géométrique de Nyquist

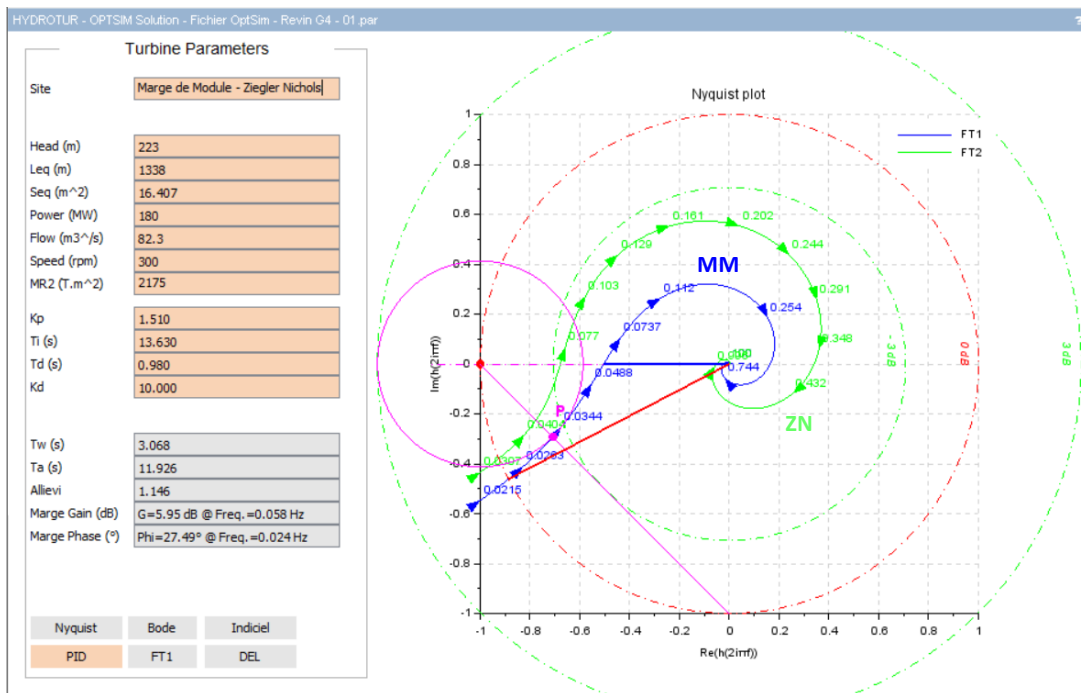


Figure 69 : Comparaison des méthodes Marge de Module et Ziegler-Nichols dans le plan de Nyquist



La marge de gain passe de 6 dB (**FT1 : Marge de Module**) à 3.45 dB (**FT2 : Ziegler-Nichols**)

7.2.3.2 Comparaison des méthodes dans le domaine temporel

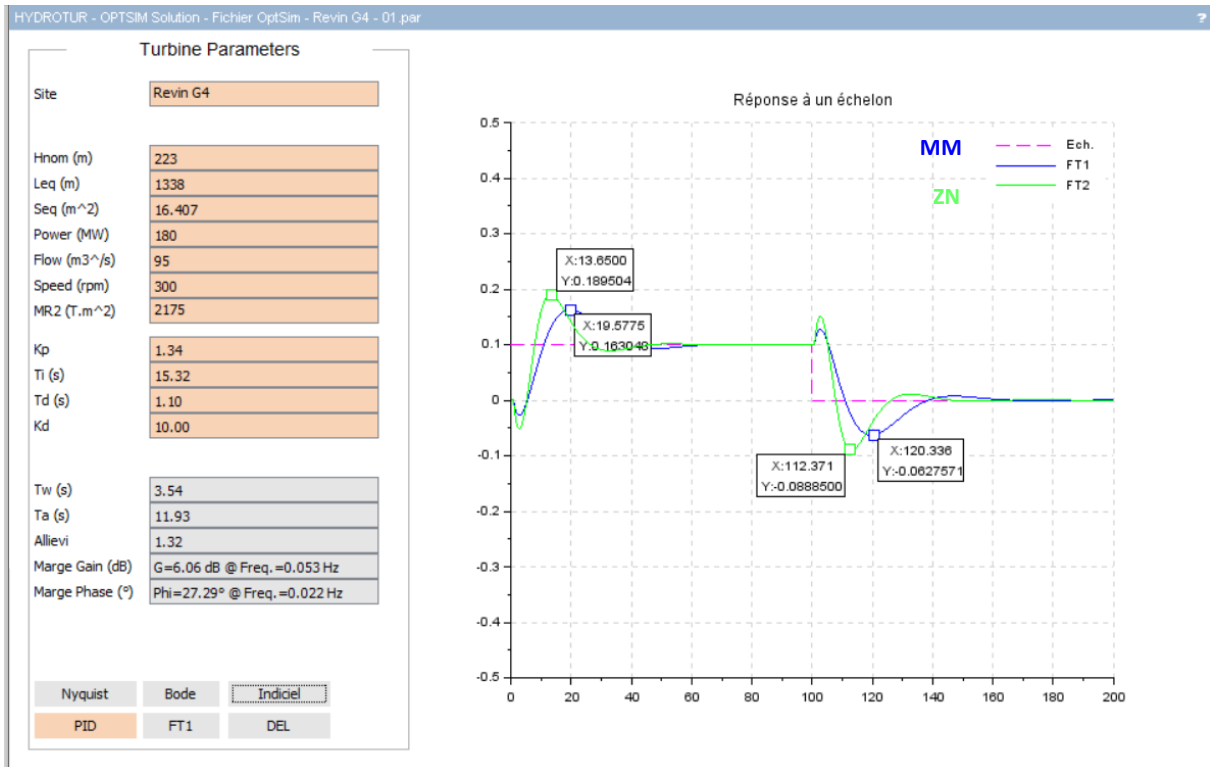


Figure 70 : Comparaison des méthodes Marge de Module et Ziegler-Nichols dans le domaine temporel

Le dépassement par la méthode de la marge de module (FT1 : Marge de Module) est inférieur de 2% au dépassement obtenu par la méthode Ziegler-Nichols (FT2 : Ziegler-Nichols) pour une vitesse équivalente.

7.2.3.3 Autres réglages possibles concernant la méthode de Ziegler-Nichols

Le site https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thode_de_Ziegler-Nichols indique également d'autres valeurs pour ce mode de réglage.

Ces calculs ont été essayés dans le cadre de cette étude, mais donnent des résultats décevants : ils ne semblent pas adaptés aux études hydrauliques.

| Méthode de Ziegler-Nichols ¹ | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|
| Type de contrôle | K_p | T_i | T_d |
| P | $0.5K_u$ | - | - |
| PI | $0.45K_u$ | $T_u/1.2$ | - |
| PD | $0.8K_u$ | - | $T_u/8$ |
| PID ² | $0.6K_u$ | $T_u/2$ | $T_u/8$ |
| PIR (Pessen Integral Rule) ² | $0.7K_u$ | $T_u/2.5$ | $3T_u/20$ |
| léger dépassement ² | $0.33K_u$ | $T_u/2$ | $T_u/3$ |
| aucun dépassement ² | $0.2K_u$ | $T_u/2$ | $T_u/3$ |

Figure 71 : Valeurs de réglage de la méthode Ziegler-Nichols disponibles sur le NET

7.3 Méthode de TAKAHASHI

7.3.1 Principe de la méthode

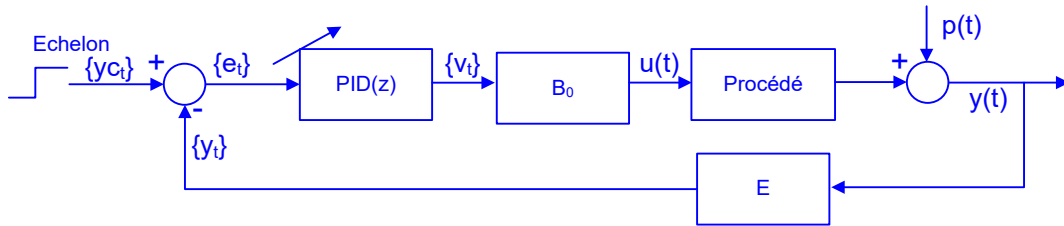


Figure 72 : Principe général de la méthode de Takahashi

| | |
|---------|---|
| B_0 | Bloqueur d'ordre 0 |
| E | Echantillonneur – période d'échantillonnage $dt_Ech=0.1$ s |
| PID (z) | Forme en z du PID Vitesse |
| P(t) | Perturbation |

Le procédé d'obtention des paramètres K_p , T_i et T_d est analogue à celui exposé dans la méthode de Ziegler-Nichols

- Les simulations sont digitales
- Le critère à minimiser est $J = \sum_{t=0}^{\infty} e_t^2$

HydroStab ne réalise qu'une approximation de la méthode de TAKAHASHI.

7.3.2 Calculs

En fonction du gain K_{cr} trouvé, HydroStab assoie les calculs

| Transmittance du régulateur | Valeurs des paramètres du régulateur suivant la méthode de TAKAHASHI | | |
|---|--|-------------------------------|---|
| $PID = K_p \cdot (1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s)$ | $K_p = 0.6 \cdot (1 - dt/Tosc) \cdot K_{cr}$ | $T_i = 0.5 \cdot (Tosc - dt)$ | $T_d = Tosc^2 / (8 \cdot Tosc - dt)$ $K_d = 4$ |

Figure 73 : Réglage du PID par la méthode de TAKAHASHI

7.3.3 Comparaison des méthodes de marge de module (FT1), ZN (FT2), Takahashi (FT3)

7.3.3.1 Nyquist

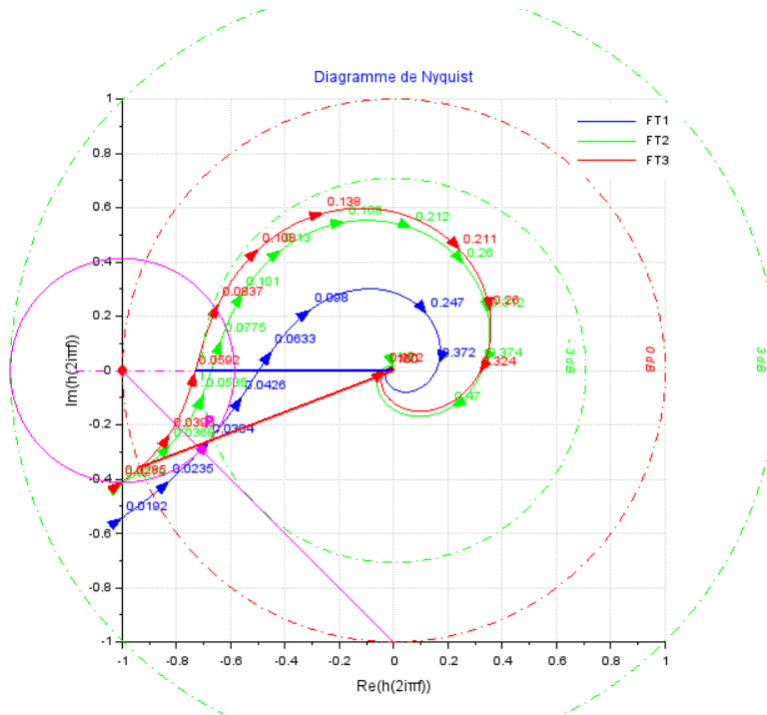


Figure 74 : Comparaison des méthodes de marge de module (FT1), ZN (FT2), Takahashi (FT3) - Nyquist

7.3.3.2 Réponses indicielles

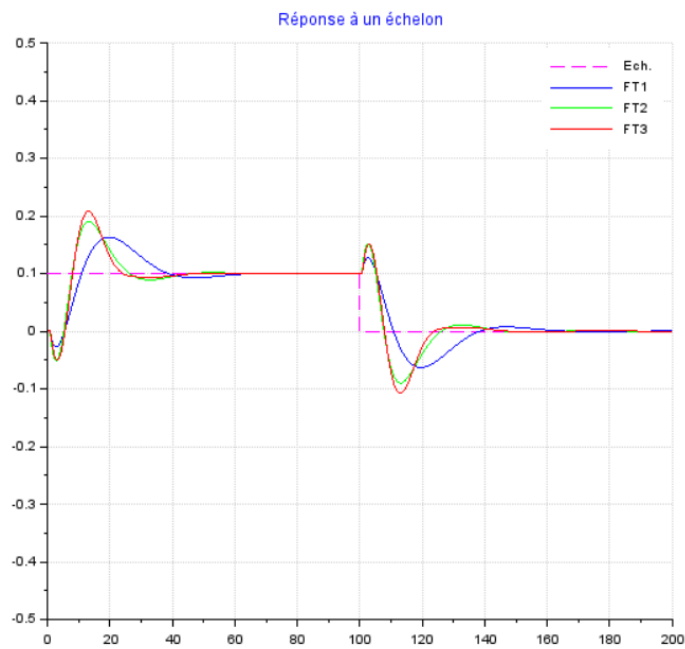


Figure 75 : Comparaison des méthodes de marge de module (FT1), ZN (FT2), Takahashi (FT3) – Réponses indicielles

7.3.3.3 Marges de gain et de phase

```

FT1 :   Marge Module
        Kp=1.34 Ti=15.32 s Td=1.10 s Kd=10.00
        Marge de Gain G=6.06 dB @ Freq.=0.053 Hz           Marge de Phase Phi=27.29° @ Freq.=0.022 Hz

FT2 :   Ziegler-Nichols
        Kp=1.65 Ti=10.36 s Td=2.07 s Kd=10.00
        Marge de Gain G=3.45 dB @ Freq.=0.064 Hz           Marge de Phase Phi=21.54° @ Freq.=0.030 Hz

FT3 :   Takahaschi
        Kp=1.64 Ti=10.31 s Td=2.59 s Kd=4.00
        Marge de Gain G=2.73 dB @ Freq.=0.059 Hz           Marge de Phase Phi=20.88° @ Freq.=0.031 Hz
    
```

Figure 76 : Comparaison des méthodes de marge de module (FT1), ZN (FT2), Takahashi (FT3) – Marges de gain et de phase – Console Scilab

8 SIMULATION NON LINEAIRE DE L'USINE DE REVIN

L'étude précédente a montré des méthodes approchantes, fournissant le réglage élémentaire du quadruplet (K_p, T_i, T_d, K_d) du correcteur PID de vitesse.

Ce dernier chapitre aborde la simulation de systèmes non linéaires, tels qu'ils sont décrits dans les modèles de la bibliothèque de composants **HYDROTUR**, développés sous XCOS, et dont la liste est rappelée en Annexe E.

8.1 Méthode de l'étude

- 1 Réaliser une simulation linéaire sous **HydroStab** avec les données hydrauliques de l'ouvrage
- 2 Transférer les données hydrauliques et le quadruplet (K_p, T_i, T_d, K_d) dans les fichiers de programmations des simulateurs de turbines.
- 3 Utiliser le perturbographe sur la charge réseau pour optimiser le gain K_p , suivant différentes séquences
- 4 Enregistrer chaque séquence

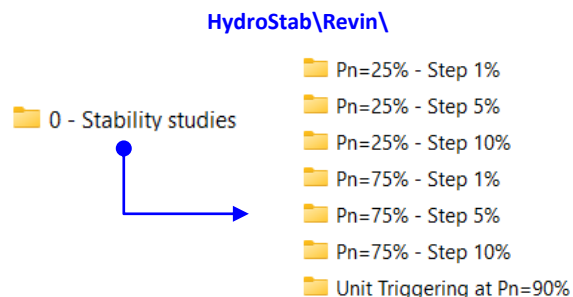
Le perturbographe, utilisé en Annexe E.6, est un des éléments fournis dans le module ATOMS HYDROTUR-SegPal, d'extension de la bibliothèque standard de XCOS, pouvant être téléchargé sur le site :

<http://atoms.scilab.org/toolboxes/SegPal/2.2.2>



8.2 Caractéristiques des simulations

Dans ce document, on se contente d'adoindre les résultats des simulations effectuées, et disponibles dans le répertoire :



 Ces études font partie du troisième volet **HYDROTUR – HydroSim**, disponible en module **ATOMS** de Scilab

Pour consulter ces fichiers « scg », ouvrir Scilab, se positionner dans ces répertoires à l'aide du gestionnaire de fichiers Scilab, puis double clic sur les fichiers.

En général, il s'agit de trouver le meilleur compromis entre les survitesse/surpressions conduite.

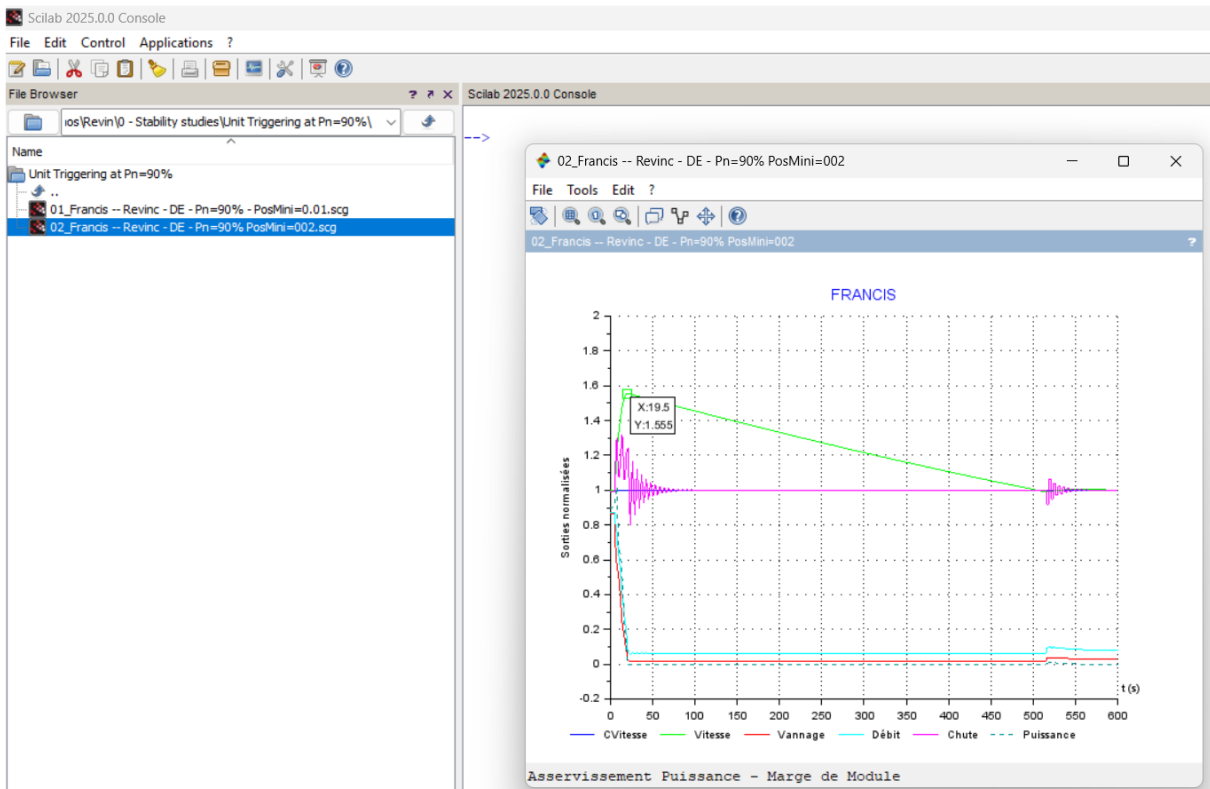
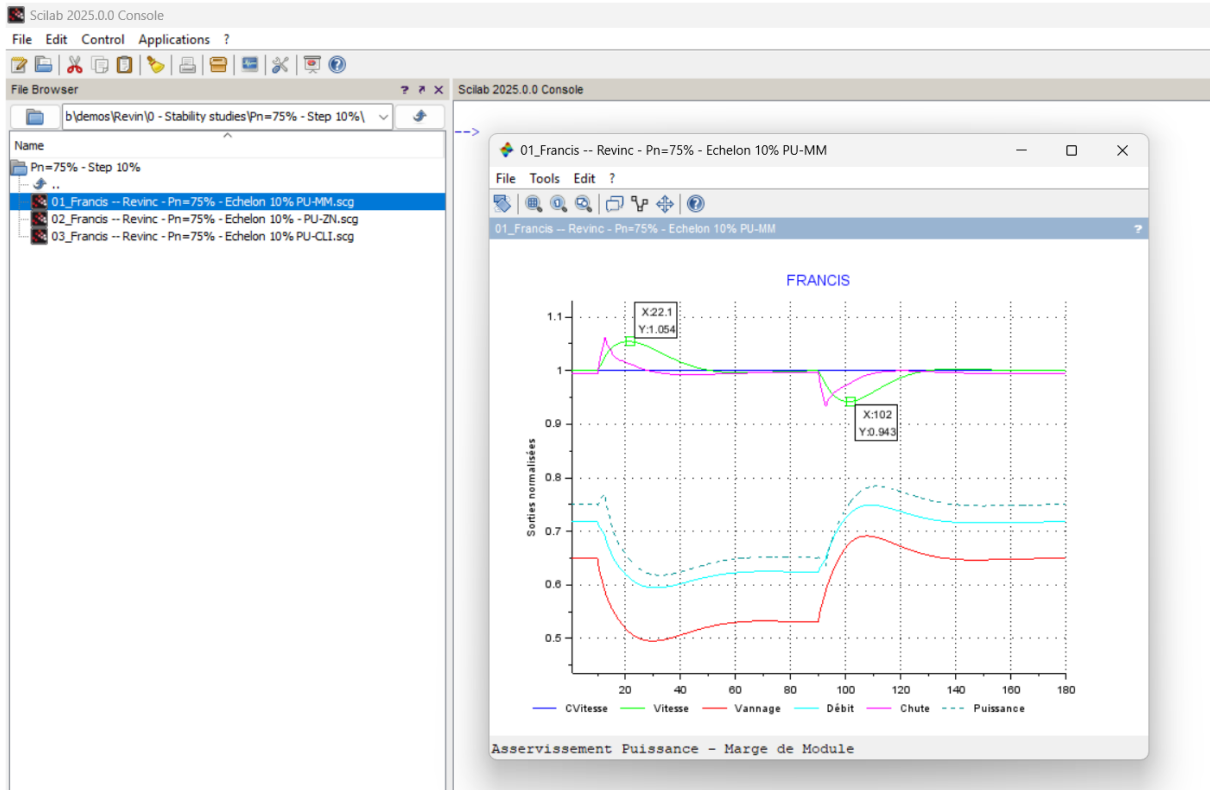


Figure 77 : Exemple de simulations non linéaire sur l'usine de Revin

ANNEXES


A. HYDROSTAB - CALTUR : FEUILLE DE CALCUL EXCEL

A.1 Feuille principal « Longueur-Section »

Note de calcul CALTUR - Version 1.3.xlsx - Longueur-Section

| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | | | |
|----|----------------|---|----------|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---------------------------------|------------------------------|--|
| 1 | GROUPE: | | 1 | SITE: | | | | | | | | | | | | FRANCIS | Éléments à renseigner | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | TURBINE: | Résultat | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | Unité | | |
| 4 | | | | Temps de lancé mécanique(s): Ta = 10.807 | | | | | | | | | | | | MR2 (*) | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | Vitesse | | |
| 6 | | | | Tw/Ta= 0.198 | | | | | | | | | | | | Puissance | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | Débit | | |
| 8 | | | | Vitesse spécifique ns = 189.783 | | | | | | | | | | | | Chute | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | | | | Diam. Roue (**) | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | (**) Non obligatoire | | |
| 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | CONDUITE: | | | | | | | | | | | | Paramètre d'Allievi = | | |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | | | Temps de lancé hydraulique (s): | | |
| 15 | | | | | | | | | | | | | | | | Longueur équivalente | | |
| 16 | | | | | | | | | | | | | | | | Leq = 700.00 m | | |
| 17 | | | | | | | | | | | | | | | | Section équivalente Seq = | | |
| 18 | | | | | | | | | | | | | | | | Débit | | |
| 19 | | | | | | | | | | | | | | | | Supplémentaire | | |
| 20 | | | | | | | | | | | | | | | | Total | | |
| 21 | | | | | | | | | | | | | | | | v | | |
| 22 | | | | | | | | | | | | | | | | L*v | | |
| 23 | | | | | | | | | | | | | | | | L/v | | |
| 24 | | | | | | | | | | | | | | | | v équivalent = | | |
| 25 | | | | | | | | | | | | | | | | L*v total = | | |
| 26 | | | | | | | | | | | | | | | | Débit nominal | | |
| 27 | | | | | | | | | | | | | | | | Chute nominale | | |
| 28 | | | | | | | | | | | | | | | | Rendement η | | |
| 29 | | | | | | | | | | | | | | | | 5.860949 | | |
| 30 | | | | | | | | | | | | | | | | 4102.66 | | |
| 31 | | | | | | | | | | | | | | | | 5.66 | | |
| 32 | | | | | | | | | | | | | | | | 6.90 | | |
| 33 | | | | | | | | | | | | | | | | 3.18 | | |
| 34 | | | | | | | | | | | | | | | | 3.02 | | |
| 35 | | | | | | | | | | | | | | | | 4.58 | | |
| 36 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 37 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 38 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 39 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 40 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 41 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 42 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 43 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 44 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 45 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

A.2 - Feuille secondaire « Débit-Rendement »


Note de calcul CALTUR - Version 1.3.xlsx - Débit-Rendement

Calcul Débit Rendement

| à Saisir | Résultat | |
|--|----------|--|
| Constantes | | |
| rho | 1000.00 | Masse volumique de l'eau (kg/m ³) |
| g | 9.81 | Accélération de la pesanteur (m/s ²) |
| Données du Groupe | | |
| H (m) | 195.00 | Hauteur de chute (m) |
| P (MW) | 306.00 | Puissance nominale du groupe (MW) |
| Calcul du rendement si le débit est connu | | |
| Q (m ³ /s) | 175.7 | Débit (m ³ /s) |
| eta | 0.91 | Calcul du rendement |
| Calcul du débit si le rendement est connu | | |
| eta | 0.910 | Rendement nominal du groupe |
| Q (m ³ /s) | 175.70 | Calcul du débit (m ³ /s) |

Formule

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot Q$$

B. VARIATIONS SAISONNIERES – MARNAGE – ADAPTATION DES PID

Dans l'exemple ci-dessous, on suppose un site soumis à un fort marnage

Le PID, calculé avec une chute de 80 m devient instable pour une chute passant à 50 m

- FT1 – PID Marge de Module « d'été », chute 80 m
- FT2 – Conditions hivernales : la chute passe de 80 m à 50 m. Le PID est instable
- FT3 : On recalcule le PID « d'hiver » par la Marge de Module

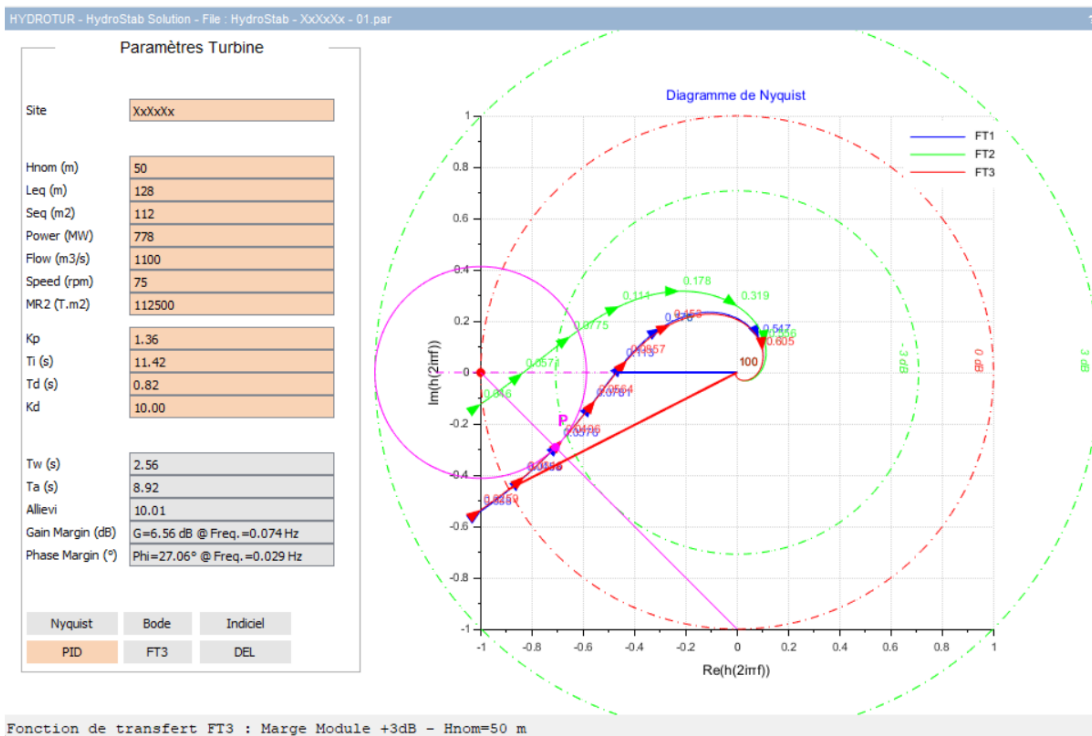
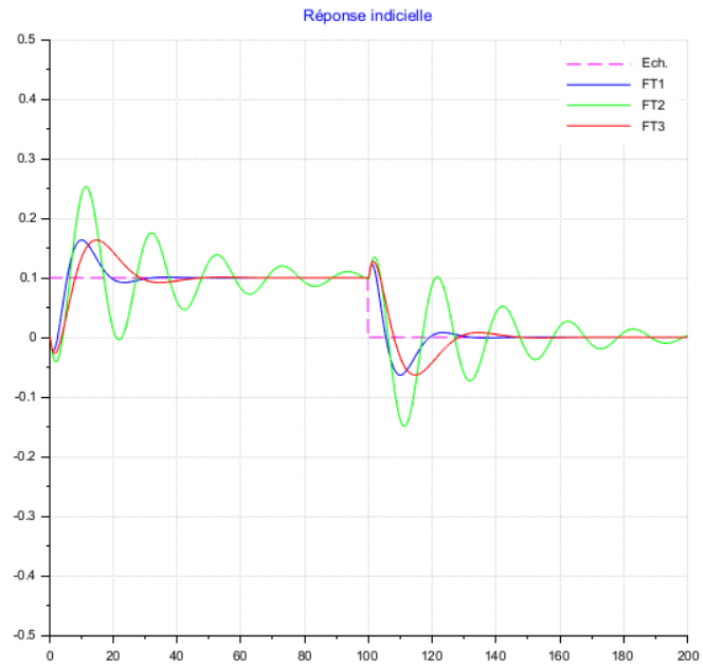
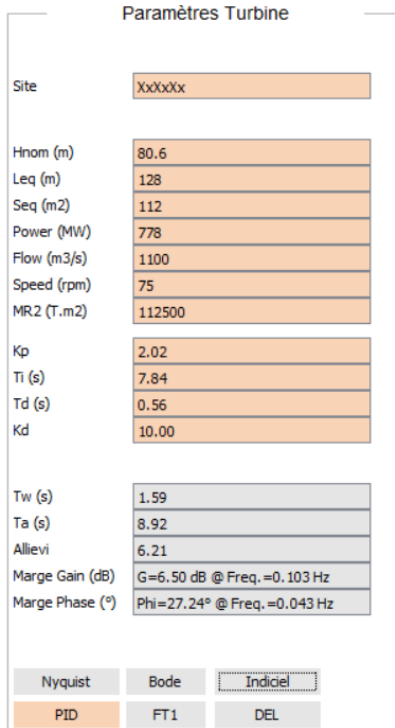


Figure 78 : Variation du marnage - PID "été" et "hiver" - Fichier : HydroStab\demos\Test\ HydroStab - XxXxXx - 01.par

Conclusion : l'exploitant de la centrale devra donc commuter les jeux de paramétrages des PID à la mi-saison

C. EXEMPLE DE FICHIER D'ENREGISTREMENT D'UNE SESSION HYDROSTAB

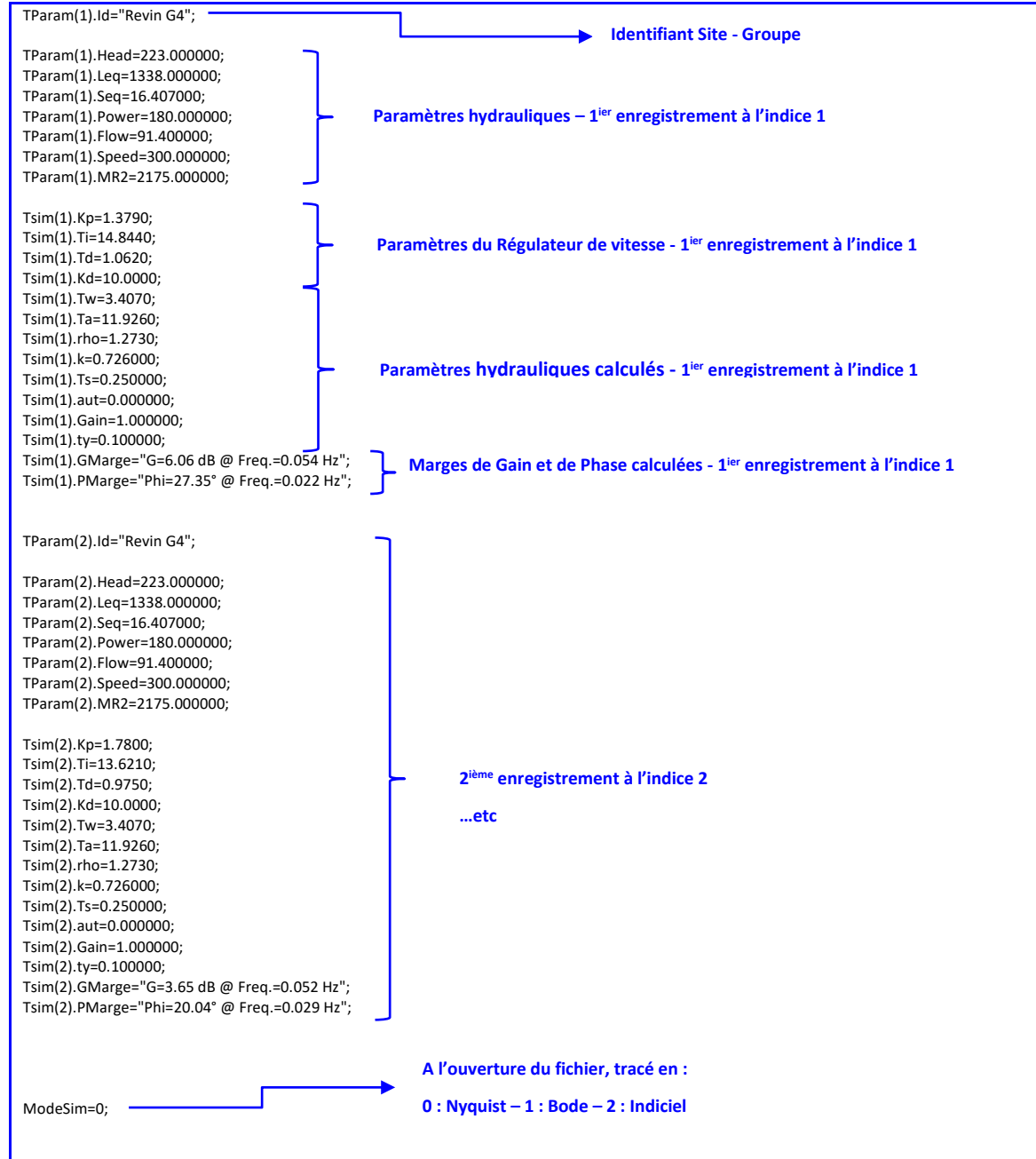


Figure 79 : Structure d'un enregistrement « .PAR » dans une session HydroStab

D. STRUCTURE OLEOHYDRAULIQUE DU SYSTEME COPIANT SYSCOP A 2 ETAGES

D.1 Principe de fonctionnement du système copiant double étage

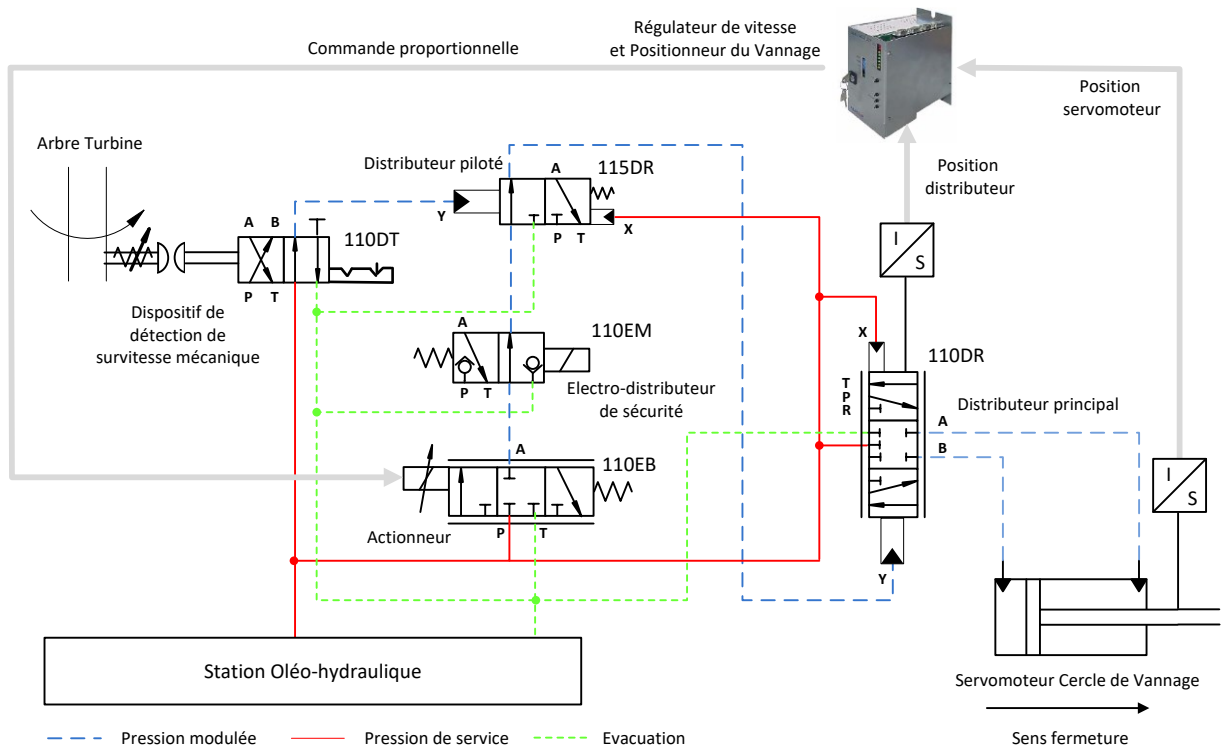


Figure 80 : Schéma simplifié de commande de l'organe de réglage – Système copiant SYSCOP à 2 organes


E. ELEMENTS DES SCHEMATHEQUES HYDROTUR-HydroSim

E.1 Liste des schémathèques HYDROTUR-HydroSim

Disponible
 Prévision

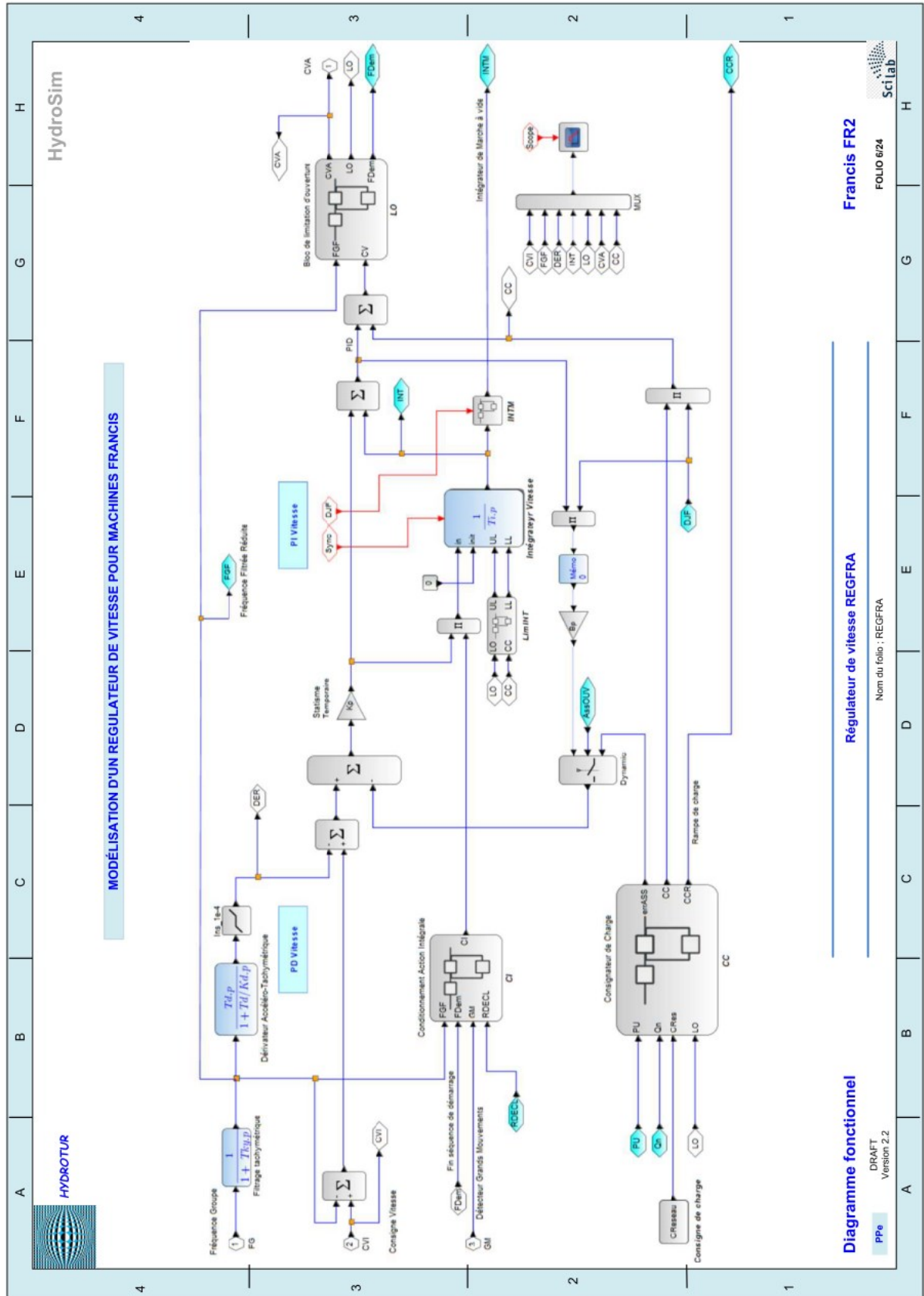
| Type de turbine | Nom/Répertoire | Caractéristiques |
|---|----------------|---|
| FRANCIS | FR2 | Turbine et conduite modélisées suivant des formules analytiques |
| | FR4 | Turbine et adductions modélisées à l'aide de collines machines Interpolation et extrapolation sur le couple et le débit $(q_{11}, c_{11}) = F(N, O)$ |
| | FR5 | Turbine et adductions modélisées à l'aide de collines machines – Béliet de masse Interpolation et extrapolation sur le couple et le débit $(q_{11}, c_{11}) = F(\text{Arctg}(\varphi), O)$ |
| PELTON (HYDROTUR SciLab 6 : 1 seul schéma PELTON couvre maintenant l'ensemble des modèles PELTON) | PELT1 | Turbine PELTON axe horizontal, 1 injecteur et 1 défecteur Défecteur en suiveur de l'injecteur pilote Turbine et conduite modélisées suivant des formules analytiques |
| | PELT2 | Turbine PELTON axe horizontal, 2 injecteurs et 1 défecteur Défecteur en suiveur de l'injecteur pilote Turbine et conduite modélisées suivant des formules analytiques |
| | PELT3 | Pelton 3 jets axe vertical avec ou sans répartiteur de jets. Défecteurs en suiveur de l'injecteur pilote Turbine et conduite modélisées suivant des formules analytiques |
| | PELT4 | Pelton 4 jets axe vertical avec ou sans répartiteur de jets. Défecteurs en suiveur de l'injecteur pilote Turbine et conduite modélisées suivant des formules analytiques |
| | PELT5 | Pelton 5 jets axe vertical avec ou sans répartiteur de jets. Défecteurs en suiveur de l'injecteur pilote Turbine et conduite modélisées suivant des formules analytiques |
| | PELT6 | Pelton 6 jets axe vertical avec ou sans répartiteur de jets. Défecteurs en suiveur de l'injecteur pilote Turbine et conduite modélisées suivant des formules analytiques |
| KAPLAN | KB1 | Turbine et adductions modélisées à l'aide d'une colline analytique – Béliet de masse. Interpolation et extrapolation sur la moyenne géométrique Pales/Vannage et Vitesse. $(\text{Couple réduit} = F(N, \sqrt{P * V}))$ |
| | KB2 | Turbine et conduite modélisées par une fonction de transfert. Conjugaison entre directrices et aubes |

Figure 81 : Liste des modèles non linéaires et algorithmes disponibles


 La liste indiquée n'est, bien sûr, pas exhaustive et évoluera dans le temps, et au fil des études. Cependant, ce document ne sera pas repris pour indiquer les évolutions et enrichissements apportés.

Un document « Liste des notices » est réservé à cet usage et concerne la liste des publications.

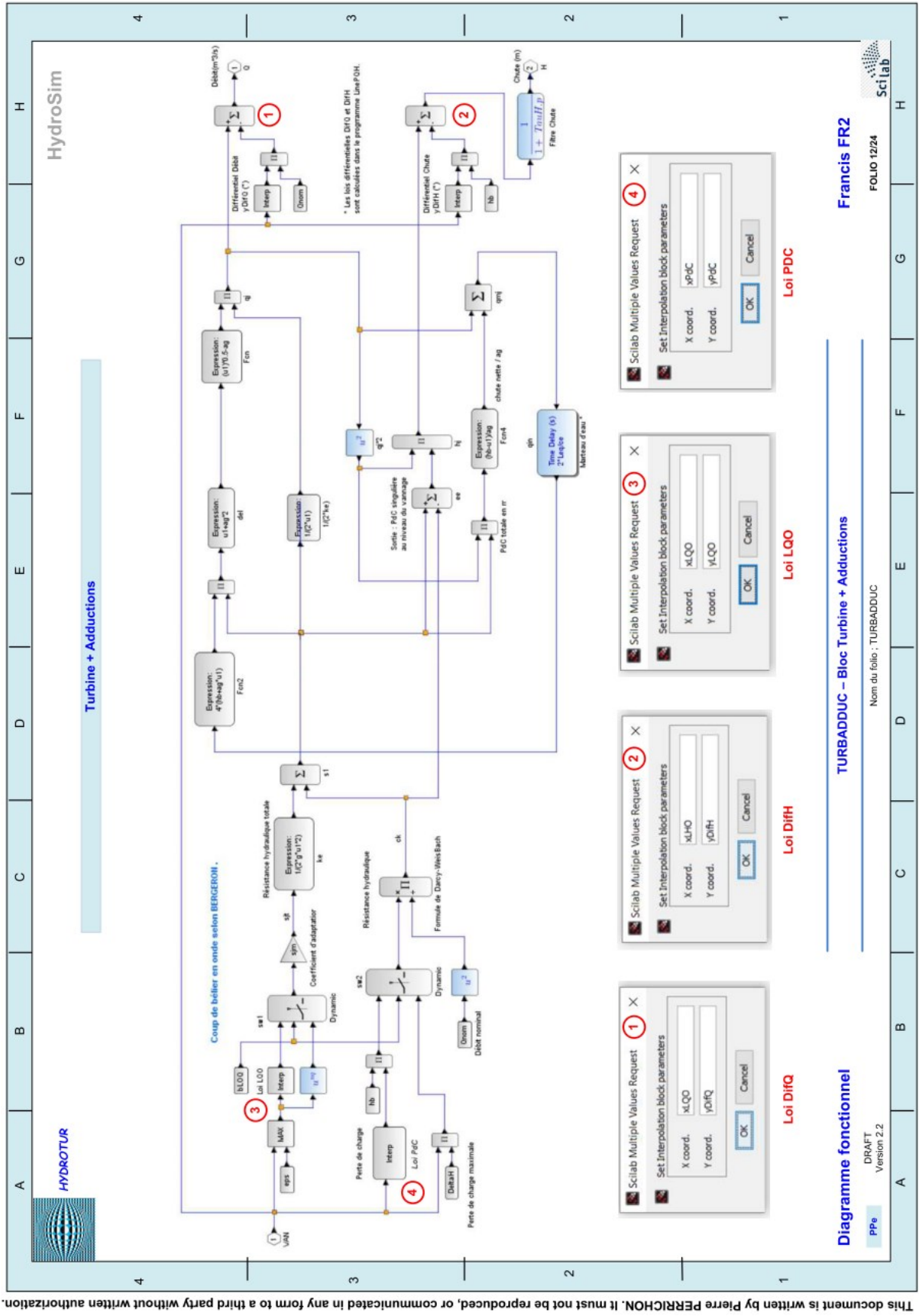
E.2 Régulateur de vitesse pour turbines FRANCIS



This document is written by Pierre PERRICHON. It must not be reproduced, or communicated in any form to a third party without written authorization.

Figure 82 : Régulateur de vitesse pour turbine FRANCIS

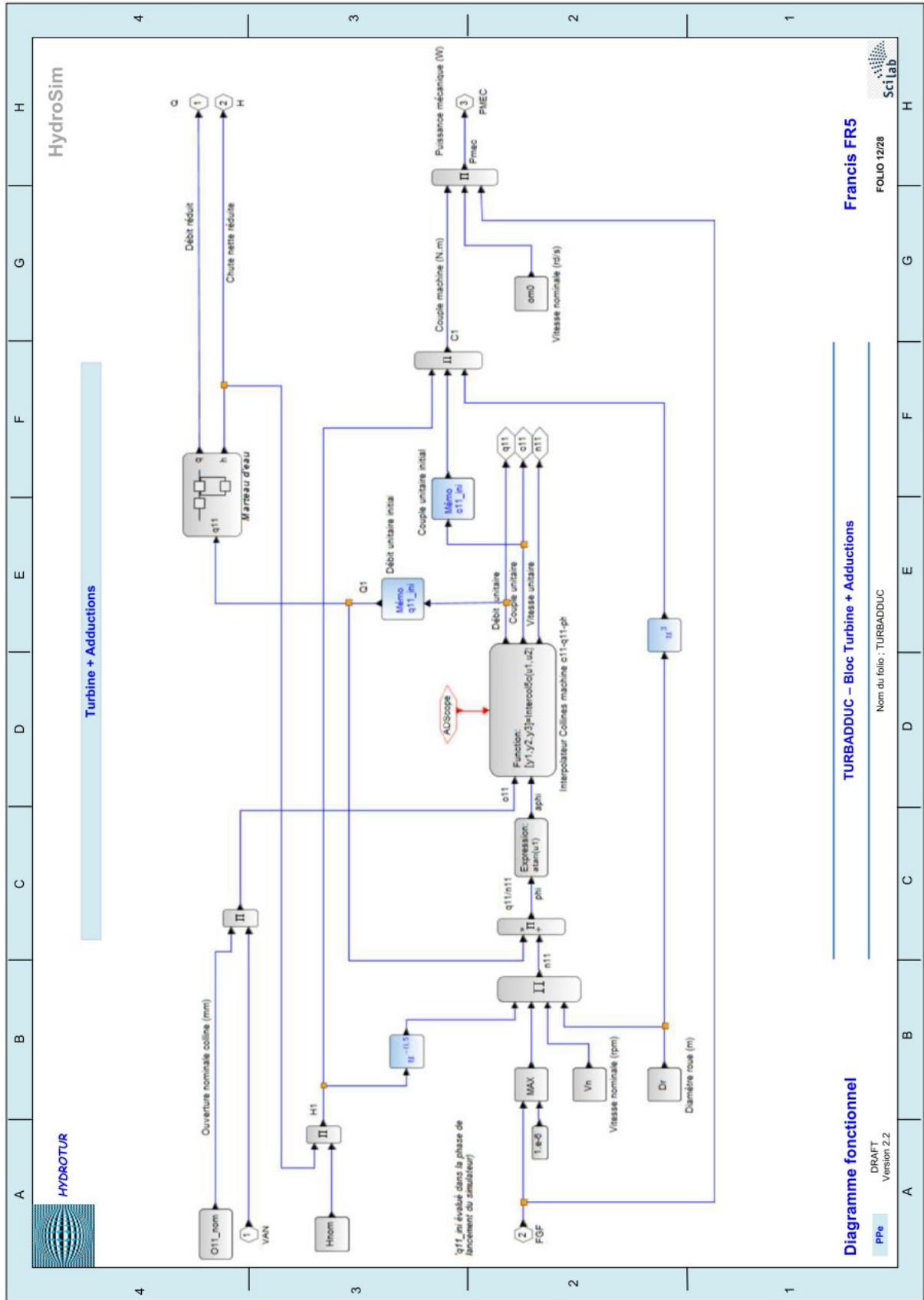
E.3 Modélisation du circuit Turbine + Adduction par équations analytiques



This document is written by Pierre PERRICHON. It must not be reproduced, or communicated in any form to a third party without written authorization.

Figure 83 : Modélisation du circuit Turbine + Adduction par équations analytiques

E.4 Modélisation du circuit Turbine + Adduction avec colline machine [n11-c11-q11]



This document is written by Pierre PERRICHON. It must not be reproduced, or communicated in any form to a third party without written authorization.

Figure 84 : Modélisation du circuit Turbine + Adduction – Circuit avec colline machine [n11-q11-c11]

E.5 Modélisation du système copiant

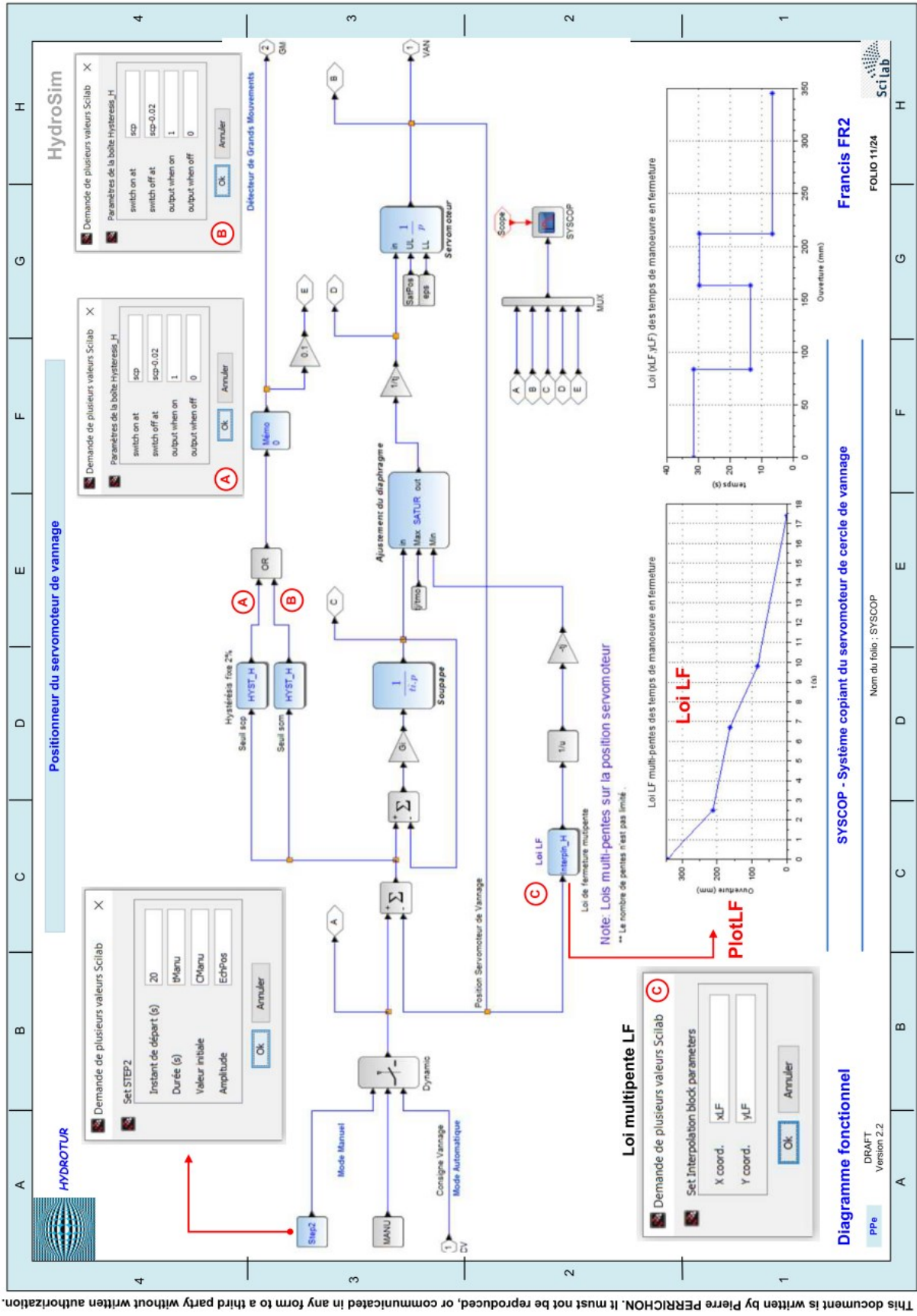
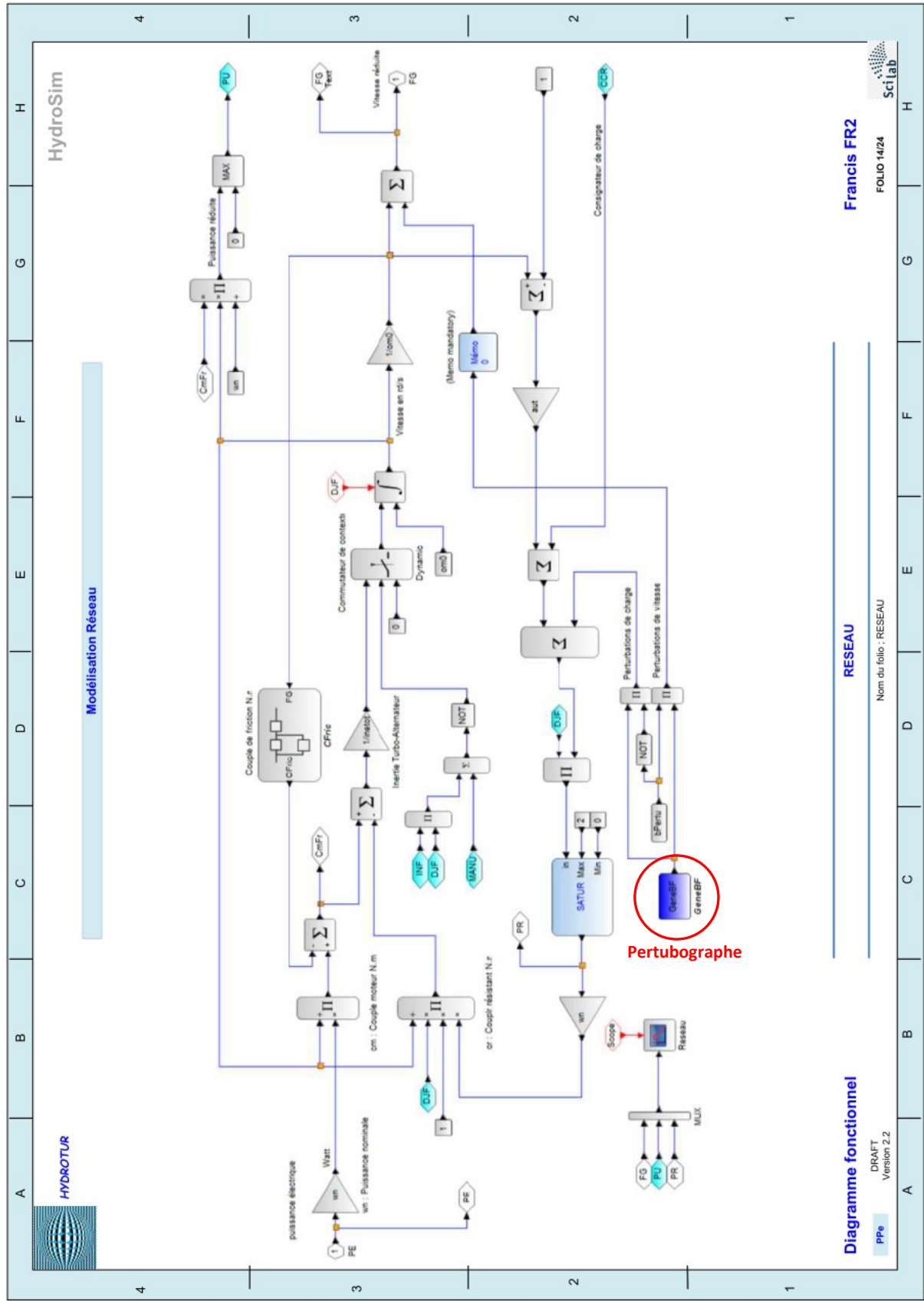


Figure 85 : Modélisation du système copiant double étage

E.6 Modélisation du circuit Réseau



This document is written by Pierre PERRICHON. It must not be reproduced, or communicated in any form to a third party without written authorization.

Figure 86 : Modélisation du circuit Réseau

F. AMENAGEMENT ET ORGANISATION DE L'ESPACE SCILAB

1. Après installation et premier lancement de Scilab, on obtient l'écran ci-dessous :

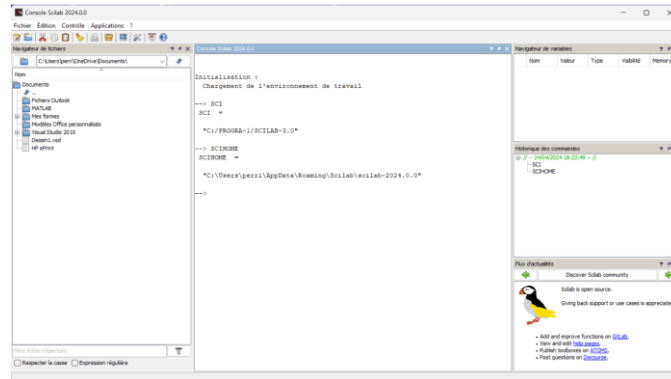
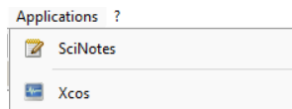


Figure 87 : Premier écran d'accueil Scilab après installation

, et fermer les trois volets situés sur la droite de l'écran

2. Ouvrir SciNotes dans le menu Application → SciNotes



3. Après Cliquer sur la barre bleue « Sans titre 1 – SciNotes » et, en maintenant enfoncé le bouton gauche de la souris, faire glisser la fenêtre vers la droite en dessous du centre de l'écran de la console, ce qui permet son ancrage à droite.

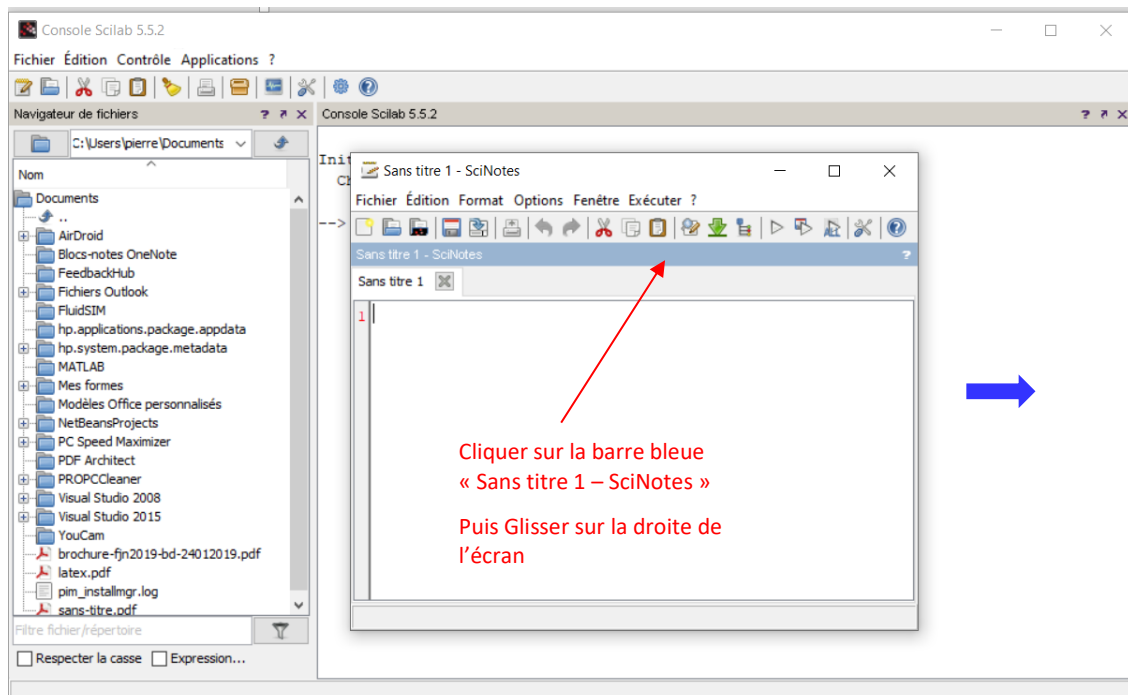
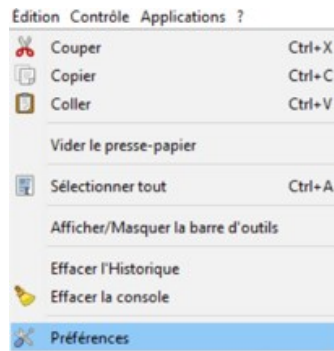


Figure 88 : Ancrage de la fenêtre SciNotes dans l'espace Scilab

On obtient ainsi le dispositif opérationnel présenté en *Figure 13*

4. Sauvegarder l'environnement de travail et personnalisations

Cliquer sur « Edition → Préférences »



5.

Dans le menu « Général », cliquer sur « Utiliser le répertoire de travail précédent » pour éviter de renaviguer dans le gestionnaire de fichiers

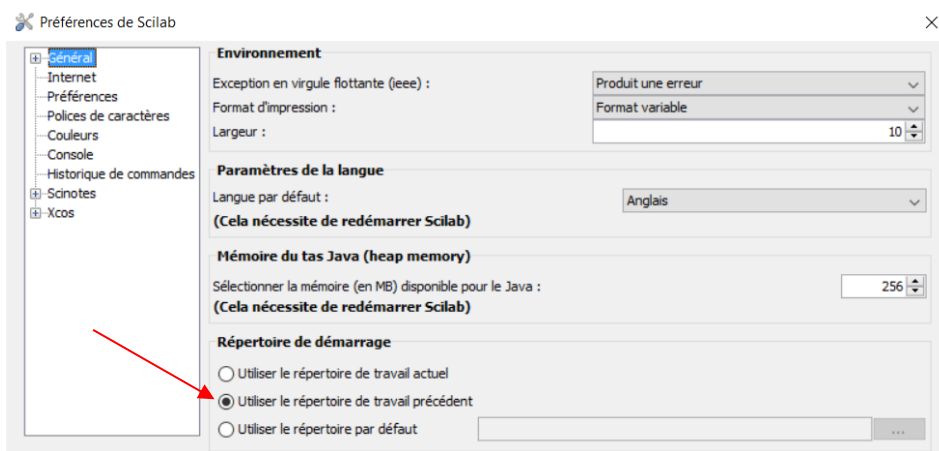


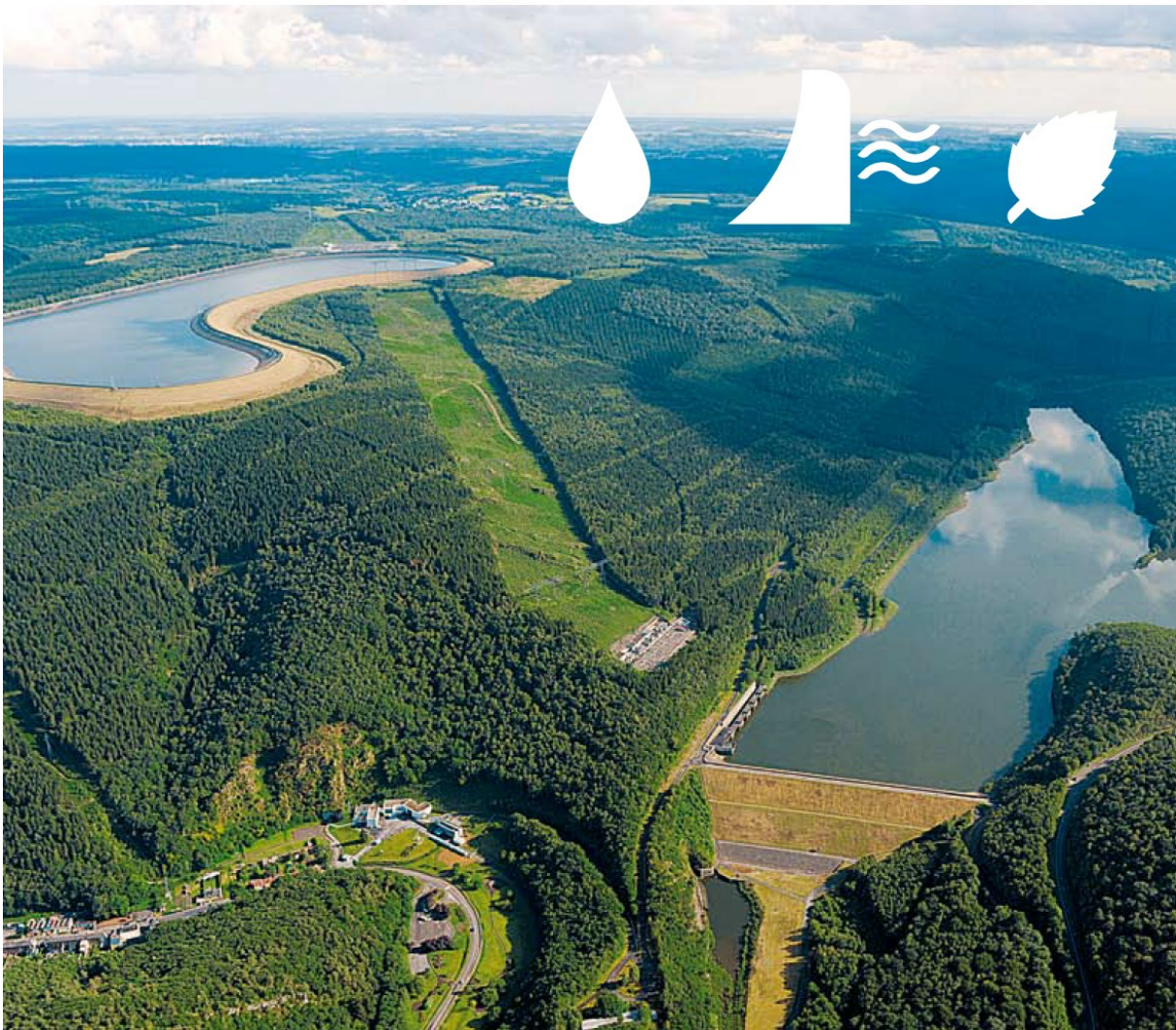
Figure 89 : Sauvegarde de l'environnement de travail de SciLab

G. USINE HYDROELECTRIQUE DE REVIN



Unité de Production Est - GEH Revin

LES AMÉNAGEMENTS HYDROÉLECTRIQUES DE REVIN ST NICOLAS LES MAZURES



Une énergie renouvelable, stockable, et disponible rapidement

L'aménagement de Revin St Nicolas les Mazures, a été la 1^{ère} usine EDF équipée de **4 groupes réversibles** «turbine/pompe» de **200 MW** de puissance chacun. C'est actuellement la 3^e STEP en France par la puissance totale installée.

2 minutes seulement suffisent pour qu'elle atteigne sa puissance maximale de **800 MW** (soit 1/3 de la puissance totale de la centrale nucléaire de Chooz qui nécessite plusieurs heures pour monter en puissance).

Mais son originalité principale réside dans son mode de fonctionnement.

Pendant les périodes de forte consommation d'électricité, l'eau du bassin supérieur est turbinée puis stockée dans le bassin inférieur. Pendant les heures de faible consommation, l'eau du bassin inférieur est pompée, grâce aux groupes réversibles pour être stockée à nouveau dans le bassin supérieur. Et ainsi de suite.

Par sa rapidité d'intervention et sa réserve de puissance, la STEP joue un rôle essentiel dans la sécurité et la régulation de l'alimentation électrique des clients d'EDF. Elle pourrait également soutenir le redémarrage de la production d'électricité dans l'hypothèse d'une panne générale.

Compte tenu de son rôle spécifique, la mise en service de l'usine est commandée à distance depuis le **Centre de Conduite Hydraulique** de Lyon.

Une trentaine de salariés assurent au quotidien l'exploitation des ouvrages ainsi que leur maintenance.

La STEP de Revin en quelques chiffres

Mise en service : 1976
Puissance totale : 800 MW
disponibles en 2 mn

Usine souterraine
Caverne principale : 115 m de longueur, 17 m de largeur, 16 m de hauteur
Tunnel d'accès : 170 m de longueur
4 groupes réversibles de 200 MVA, turbine de type Francis

Poste de transformation
4 transformateurs de 200 MVA
13 000/400 000 Volts

Bassin supérieur

Superficie : 66 ha
Digue : 4 200 m de longueur, 9 à 18 m de hauteur
Volume total : 8,5 millions de m³
Volume utile : 6,9 millions de m³

Bassin inférieur

Barrage : 300 m de longueur en crête, 35 m de hauteur
Volume total : 9 millions de m³
Volume utile : 6,9 millions de m³
Noyau central en argile

Lac des Vieilles Forges

5 millions de m³

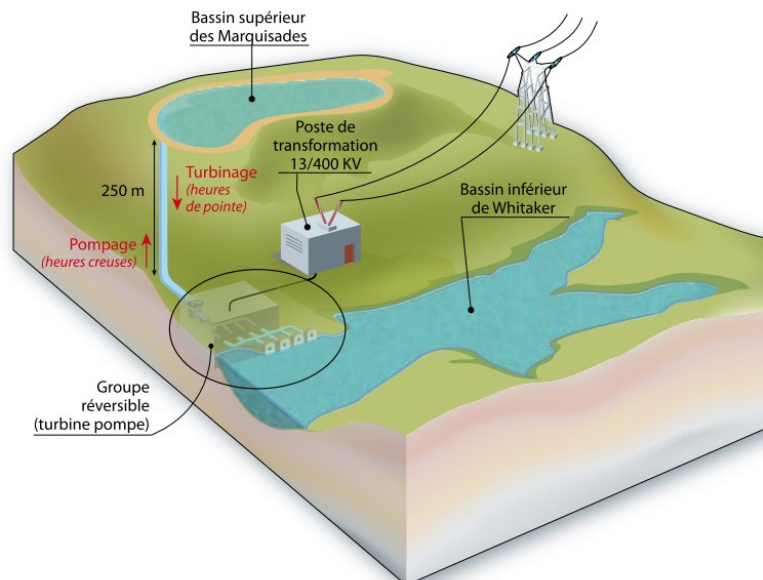


Figure 90 : Usine hydroélectrique de Revin

ADDUCTIONS HAUTE PRESSION

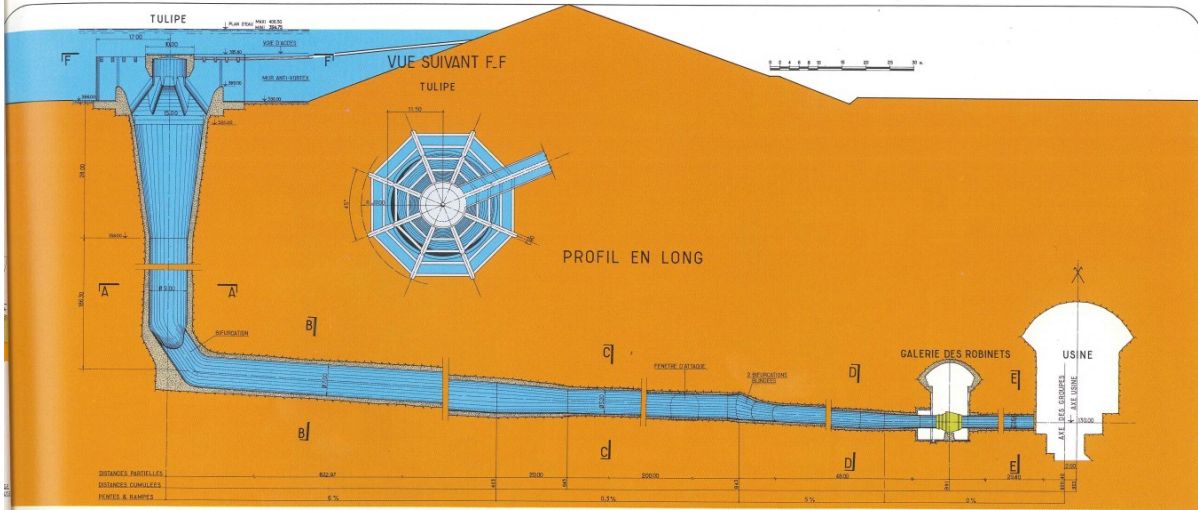


Figure 91 : Revin - Longueur/Section équivalente – Etudes

Résumé des caractéristiques principales

1- Généralités

Volume utile des bassins: 6,9 millions de mètres cubes
 Cotes d'exploitation extrêmes (NGF):
 Bassin supérieur: 406,50 394,75
 Bassin inférieur: 160,00 175,70
 Dénivelées brutes extrêmes: 246,50 219,05
 Perte de charge prévue pour 320 m³/s : 6 m
 Surpression maximum prévue: 40%
 Durée de démarrage et de prise de charge en turbine : 2 minutes
 Durée d'arrêt (avec freinage électrique) : 18 minutes.

2- Turbines-pompes



Roue de turbine-pompe

| | |
|--|----------|
| Vitesse : 300 t/mn | |
| Cote d'implantation des bâches | 130,00 |
| Turbinage | |
| Puissance maximum*: | |
| chute nette minimum (211 m) | 164 MW |
| chute nette de 223,60 à 242,40 m | 180 MW |
| Puissance maximum en surcharge*: | |
| de 180 MW pour Hn = 223,60 m | |
| à 202 MW pour Hn = 240,60 m | |
| Puissance au rendement maximum*: | |
| 130 MW pour Hn = 214,60 m | |
| 151 MW pour Hn = 243,60 m | |
| Vitesse d'emballement permanent | 410 t/mn |
| Vitesse extrême (transitoire, MD2 = 8.700 t/m ²) | 470 t/mn |
| Diamètre de roue: 4,33 m | |
| Régulateur électrique à action proportionnelle intégrale - dérivée (modèle R.A.P.I.D.) | |
| Constructeurs: Alsthom - Neyrpic, Jeumont - Schneider et Creusot-Loire. | |

3- Pivots

Type: à 12 patins, glace mobile, équilibrage hydrostatique
 Force totale: 545 tonnes
 Diamètre glace: 2,63 m
 Réfrigération extérieure, par échangeur.

4- Alternateurs- moteurs

Vitesse : 300 t/mn
 Puissance : 200 MVA
 MD2 env. : 8.500 t/m²
 Cos : 0,92
 Tension : 13 kV
 Courant nominal : 8.800 A
 Excitation statique alimentée en soutirage, avec transformateur de Compounding.
 Constructeurs : Alsthom et Jeumont-Schneider

* Entre les valeurs particulières indiquées, les variations sont sensiblement linéaires.

Figure 92 : Revin - Caractéristiques des turbines-pompes de Revin

H. LISTING TYPE APRES EXECUTION DU CONSTRUCTEUR BUILDER.SCE

```
--> exec('C:\Ppe\0 - Scilab\0 - Xcos8\10 - TURBINES\0 - HydroStab ATOMS\HydroStab\builder.sce', -1)
```

Construction du fichier Toolbox_names.sce dans le répertoire \etc\...

Building macros...

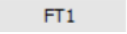

-- Creation of [HydroStablib] (Macros) --

```
genlib: Processing file: AddLegend.sci
genlib: Processing file: Bode.sci
genlib: Processing file: Calcul_FTBO_FTBF.sci
genlib: Processing file: ChangeLanguage.sci
genlib: Processing file: ChargeurXcos.sci
genlib: Processing file: CheckValues.sci
genlib: Processing file: ClearCurves.sci
genlib: Processing file: Colorize_PID_Button.sci
genlib: Processing file: DelHydroStabFigure.sci
genlib: Processing file: Display_Info_Message.sci
genlib: Processing file: Display_Results.sci
genlib: Processing file: FT_Select_GUI.sci
genlib: Processing file: FindObj_PPe.sci
genlib: Processing file: Get_FT_Button.sci
genlib: Processing file: Gradient.sci
genlib: Processing file: HydroStab_About.sci
genlib: Processing file: HydroStab_Files.sci
genlib: Processing file: HydroStab_Load.sci
genlib: Processing file: HydroStab_Load_cfg.sci
genlib: Processing file: HydroStab_Param_Def.sci
genlib: Processing file: HydroStab_Save.sci
genlib: Processing file: HydroStab_Save_cfg.sci
genlib: Processing file: HydroStab_Takahashi.sci
genlib: Processing file: HydroStab_XcrossClosure.sci
genlib: Processing file: HydroStab_Ziegler_Nichols.sci
genlib: Processing file: Init_FormatPID.sci
genlib: Processing file: K_FT.sci
genlib: Processing file: Load_IHM_PID.sci
genlib: Processing file: Load_IHM_Param.sci
genlib: Processing file: Load_PID_IHM.sci
genlib: Processing file: Load_Param_IHM.sci
genlib: Processing file: Nyquist.sci
genlib: Processing file: NyquistSymetrique.sci
genlib: Processing file: Nyquist_PPe.sci
genlib: Processing file: Nyquist_Switch.sci
genlib: Processing file: PPe_show_margins.sci
genlib: Processing file: PlotDB.sci
genlib: Processing file: Plot_Max_Reglin.sci
genlib: Processing file: PlotterErase.sci
genlib: Processing file: PrintScilabConsole.sci
genlib: Processing file: Print_sim_G_P_Marge.sci
genlib: Processing file: Read_Marge.sci
genlib: Processing file: Recherche_sim.sci
genlib: Processing file: ResetStructureSim.sci
genlib: Processing file: Saturation_FT.sci
genlib: Processing file: Scilab_About.sci
genlib: Processing file: Select_Save.sci
genlib: Processing file: Set_FT_Button.sci
genlib: Processing file: SolveurHydroStab.sci
genlib: Processing file: Sys_Bode.sci
genlib: Processing file: Sys_Compute.sci
genlib: Processing file: Sys_DEL.sci
genlib: Processing file: Sys_FT_GUI.sci
genlib: Processing file: Sys_Indiciel.sci
genlib: Processing file: Sys_Nyquist.sci
genlib: Processing file: Temporel.sci
genlib: Processing file: Titre_Echelon.sci
genlib: Processing file: ZN.sci
genlib: Processing file: ZN_GUI_1.sci
genlib: Processing file: ZN_GUI_2.sci
genlib: Processing file: ZN_Grille.sci
genlib: Processing file: ZN_Optimize.sci
genlib: Processing file: isSite.sci
```

```
genlib: Processing file: post_xcos_simulate.sci
genlib: Processing file: sysPID.sci
Generating loader.sce...
Generating unloader.sce...
Generating cleaner.sce...
```

Figure 93 : Listing après exécution du constructeur builder.sce

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Support technique du projet HYDROTUR | 5 |
| Figure 2 : Diagramme fonctionnel général d'un système de commande hydro-électrique | 7 |
| Figure 3 : Classement des méthodes de synthèse..... | 8 |
| Figure 4 : Différentes méthodes d'installation de HydroStab | 11 |
| Figure 5 : Répertoire d'installation automatique de de HydroStab..... | 11 |
| Figure 6 : Décompactage du fichier HydroStab.zip | 11 |
| Figure 7 : Contenu du répertoire HydroStab | 12 |
| Figure 8 : Ouvrage « Les Fondamentaux » de Scilab | 13 |
| Figure 9 : Exemple de chargement de la bibliothèque HydroStab dans Scilab – Utilisation du fichier loader.sce | 14 |
| Figure 10 : Variable d'environnement SCI_HYDROTUR_HydroStab | 14 |
| Figure 11 : Réduction du schéma hydraulique - Calculs préliminaires à l'étude de stabilité d'un groupe hydraulique | 15 |
| Figure 12 : Circuit de calcul des paramètres d'un PID Vitesse - Méthode de la Marge du Module | 16 |
| Figure 13 : Fenêtre d'accueil Scilab et lancement du script "Run_HydroStab" | 17 |
| Figure 14 : Fenêtre d'accueil de HYDROTUR - HydroStab Solution | 18 |
| Figure 15 : Menus pour le réglage des asservissements | 19 |
| Figure 16 : Sélection d'une FT parmi N avec le BP  | 20 |
| Figure 17 : Suppression d'une FT parmi N  | 20 |
| Figure 18 : Impression des légendes et des opérations conduites dans la console Scilab | 20 |
| Figure 19 : Barre d'outils graphiques Standard de Scilab | 21 |
| Figure 20 : Zoom dans les fenêtres graphiques..... | 21 |
| Figure 21 : Demande de confirmation dans la création d'une nouvelle configuration | 22 |
| Figure 22 : Configuration par défaut de HydroStab | 22 |
| Figure 23 : Sélection du mode de sauvegarde..... | 23 |
| Figure 24 : Sélection d'un répertoire de sauvegarde..... | 23 |
| Figure 25 : Nomination des fichiers d'enregistrements d'une session HydroStab | 23 |
| Figure 26 : Confirmation de l'enregistrement d'une session HydroStab..... | 24 |
| Figure 27 : Rechargement d'un fichier de paramétrisation..... | 24 |
| Figure 28 : Restitution d'un fichier de paramétrisation..... | 25 |
| Figure 29 : Confirmation de fermeture d'une session HydroStab | 25 |
| Figure 30 : Enrichissement d'un commentaire dans la présentation | 26 |
| Figure 31 : Symétrie dans le plan de Nyquist | 26 |
| Figure 32 : Nyquist avec Marge de Module réglée à -3dB..... | 27 |
| Figure 33 : Version de HydroStab | 28 |
| Figure 34 : Version de Scilab | 28 |
| Figure 35 : Modèles XCOS – Listing des modèles | 29 |
| Figure 36 : Modèle réduit du procédé à régler..... | 29 |
| Figure 37 : Modèle FTBO de commande du procédé en boucle fermée..... | 29 |
| Figure 38 : Modèle FTBF de commande du procédé en boucle fermée..... | 30 |

| | |
|---|----|
| Figure 39 : Diagramme bloc d'un groupe hydraulique PELTON..... | 30 |
| Figure 40 : Données d'entrées d'une étude de stabilité..... | 30 |
| Figure 41 : Circuit de calcul simplifié de modélisation d'un groupe hydraulique..... | 32 |
| Figure 42 : Plan de Nyquist..... | 33 |
| Figure 43 : Marge de module dans le plan de Nyquist | 34 |
| Figure 44 : Données d'entrée et résultats de l'étude de stabilité en petits mouvements | 34 |
| Figure 45 : Réglage de la marge de module à +3 dB..... | 34 |
| Figure 46 : Stabilité du régulateur dans le plan de Nyquist (FTBO) – $m_a \approx 0.41$ | 35 |
| Figure 47 : Réponses indicielles du régulateur en petit mouvement (FTBF) | 35 |
| Figure 48 : Diagramme de Bode en boucle ouverte - Marges de gain et de phase – Réglage m_a à +3dB..... | 35 |
| Figure 49 : Réglage de la marge de module à -3 dB | 36 |
| Figure 50 : Stabilité du régulateur dans le plan de Nyquist (FTBO) – $m_a \approx 0.29$ | 36 |
| Figure 51 : Réponses indicielles du régulateur en petit mouvement (FTBF) | 36 |
| Figure 52 : Diagramme de Bode en boucle ouverte - Marges de gain et de phase – Réglage m_a à -3dB..... | 37 |
| Figure 53 : Principe de la méthode de Ziegler-Nichols | 38 |
| Figure 54 : PID en boucle fermée « FTBF.zcos » pour application de la méthode Ziegler-Nichols | 38 |
| Figure 55 : Choix des paramètres d'optimisation pour les méthodes Ziegler-Nichols ou Takahashi | 38 |
| Figure 56 : Activation de la méthode de Ziegler-Nichols..... | 38 |
| Figure 57 : Scope Ziegler-Nichols avec droite de régression linéaire et maximums locaux | 39 |
| Figure 58 : Boîte de dialogue Ziegler-Nichols | 39 |
| Figure 59 : Boîte de saisie du gain K_{cr} | 40 |
| Figure 60 : Principe de réglage général du gain critique K_{cr} dans la méthode de Ziegler-Nichols | 40 |
| Figure 61 : Exemple de réglage du procédé de Ziegler-Nichols..... | 41 |
| Figure 62 : Proposition de réglage d'un PID suivant la méthode de Ziegler-Nichols – Méthode n°1 | 41 |
| Figure 63 : Vérifications de la méthode de Ziegler-Nichols | 42 |
| Figure 64 : Vérification du gain critique K_{cr} dans le plan de Nyquist | 43 |
| Figure 65 : Vérification de la période des oscillations T_{osc} dans la méthode de Ziegler-Nichols | 43 |
| Figure 66 : Phase active de recherche automatique du gain critique K_{cr} | 44 |
| Figure 67 : Phase terminale de recherche du gain critique K_{cr} | 44 |
| Figure 68 : Option de traçage Trace_ZN..... | 45 |
| Figure 69 : Comparaison des méthodes Marge de Module et Ziegler-Nichols dans le plan de Nyquist | 45 |
| Figure 70 : Comparaison des méthodes Marge de Module et Ziegler-Nichols dans le domaine temporel..... | 46 |
| Figure 71 : Valeurs de réglage de la méthode Ziegler-Nichols disponibles sur le NET | 46 |
| Figure 72 : Principe général de la méthode de Takahashi | 47 |
| Figure 73 : Réglage du PID par la méthode de TAKAHASHI | 47 |
| Figure 74 : Comparaison des méthodes de marge de module (FT1), ZN (FT2), Takahashi (FT3) - Nyquist | 48 |
| Figure 75 : Comparaison des méthodes de marge de module (FT1), ZN (FT2), Takahashi (FT3) – Réponses indicielles | 48 |
| Figure 76 : Comparaison des méthodes de marge de module (FT1), ZN (FT2), Takahashi (FT3) – Marges de gain et de phase – Console SciLab..... | 49 |
| Figure 77 : Exemple de simulations non linéaire sur l'usine de Revin | 50 |
| Figure 78 : Variation du marnage - PID "été" et "hiver" - Fichier : HydroStab\demos\Test\ HydroStab - XxXxXx - 01.par | 53 |

| | |
|--|----|
| Figure 79 : Structure d'un enregistrement « .PAR » dans une session HydroStab | 54 |
| Figure 80 : Schéma simplifié de commande de l'organe de réglage – Système copiant SYSCOP à 2 organes..... | 55 |
| Figure 81 : Liste des modèles non linéaires et algorithmes disponibles..... | 56 |
| Figure 82 : Régulateur de vitesse pour turbine FRANCIS..... | 57 |
| Figure 83 : Modélisation du circuit Turbine + Adduction par équations analytiques | 58 |
| Figure 84 : Modélisation du circuit Turbine + Adduction – Circuit avec colline machine [n11-q11-c11] | 59 |
| Figure 85 : Modélisation du système copiant double étage..... | 60 |
| Figure 86 : Modélisation du circuit Réseau | 61 |
| Figure 87 : Premier écran d'accueil Scilab après installation..... | 62 |
| Figure 88 : Ancrage de la fenêtre SciNotes dans l'espace Scilab | 62 |
| Figure 89 : Sauvegarde de l'environnement de travail de Scilab..... | 63 |
| Figure 90 : Usine hydroélectrique de Revin..... | 65 |
| Figure 91 : Revin - Longueur/Section équivalente – Etudes | 66 |
| Figure 92 : Revin - Caractéristiques des turbines-pompes de Revin | 66 |
| Figure 93 : Listing après exécution du constructeur builder.sce | 68 |

Notes personnelles

