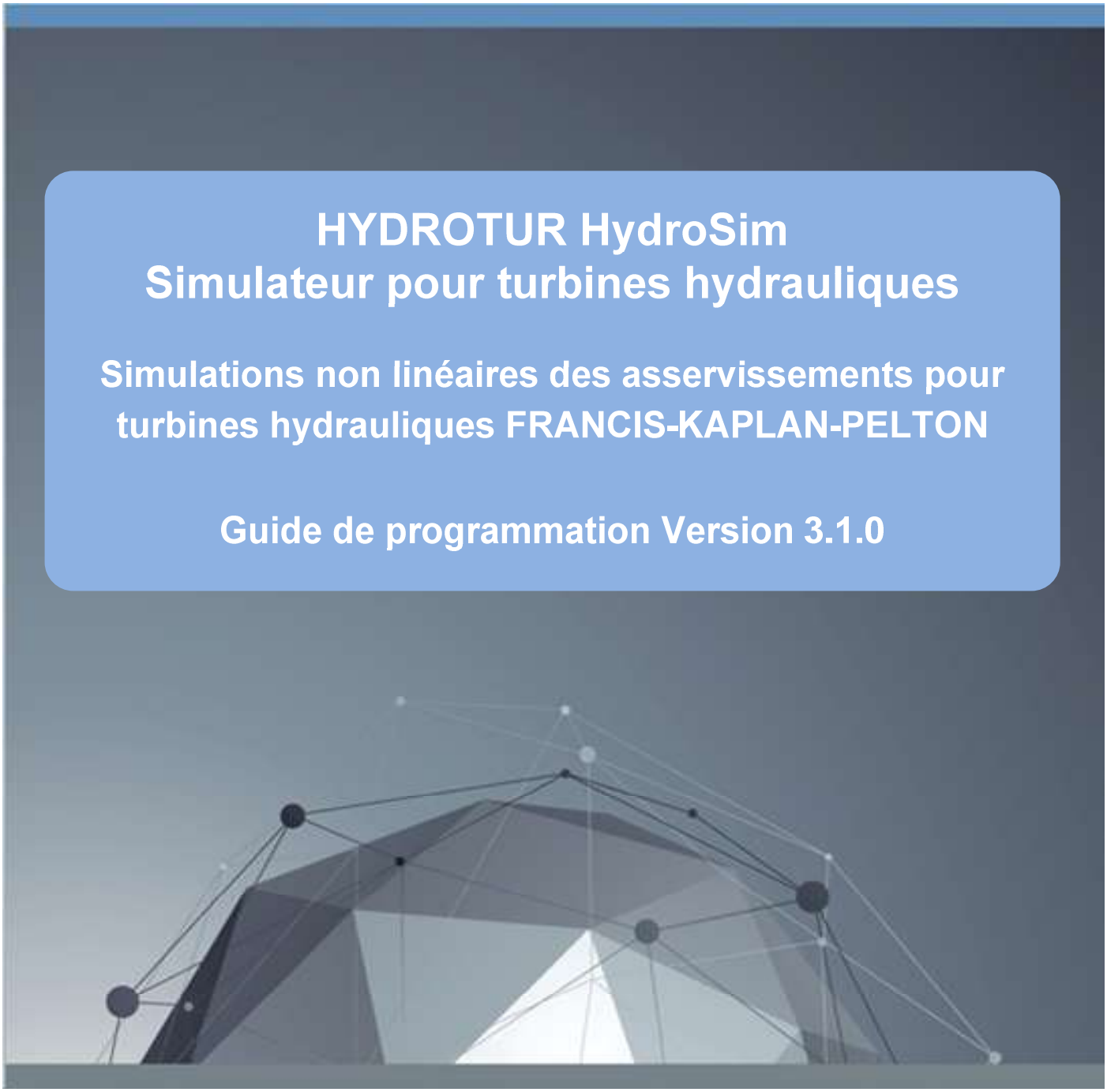


HYDROTUR

HYDROTUR HydroSim
Simulateur pour turbines hydrauliques

Simulations non linéaires des asservissements pour turbines hydrauliques FRANCIS-KAPLAN-PELTON

Guide de programmation Version 3.1.0



par Pierre Perrichon

Scilab

SOMMAIRE

BIBLIOGRAPHIE **6**

SUPPORT TECHNIQUE - CONTACT **6**

TABLE DES INDEX **7**

1 INTRODUCTION **10**

1.1 Documents disponibles 10

1.2 Modèles disponibles 10

1.3 Organisation du guide de programmation 11

1.3.1 Présentation générale 11

1.3.2 À propos de la Table des Index 11

2 STRUCTURE DE PARAMETRAGE DES SIMULATEURS **12**

2.1 Structure d'un répertoire 12

2.2 Séquences spéciales de test hors HydroSim-RUNNER 13

2.2.1 Généralités 13

2.2.2 Examples of special sequences 13

2.2.2.1 Atténuation des oscillations conduite lors d'une séquence de délestage du groupe hydraulique 13

3 GUIDE DE PROGRAMMATION **15**

3.1 Sélection de solvers – Solver RUNGE-KUTTA 15

3.2 Paramètres de simulation XCOS 16

3.3 Constantes 17

3.4 Paramétrage du circuit hydraulique et de la machine avec HydroStab 18

3.4.1 Utilisation du programme HydroStab dans la fourniture HydroSim 18

3.4.2 Données pour le calculateur HydroStab 19

3.4.3 Récupération des données HydroStab dans HydroSim 24

3.4.4 Autres paramètres 24

3.5 Paramètres du régulateur de vitesse 27

3.6 Réglage des modes de fonctionnement 33

3.7 Régulateur de Vitesse et Consignation 39

3.7.1 Principe de consignation 39

3.7.2 Paramètres généraux 40

3.7.3 Pertubographes sur la consigne de vitesse 41

3.7.4 Paramètres du bloc de Limitation d'ouverture 42

3.7.4.1 Limiteurs transitoires dans la Séquence BANG 42

3.7.4.2 Limiteurs permanents 42

3.8 Consignation en charge et modes de fonctionnement 43

3.8.1 Paramètres Réseau 43

3.8.2 Générateur de perturbation GeneBF Puissance / Fréquence 

..... 44

3.8.2.1 Paramétrage 45

3.8.2.2 Générateur d'échelons (modPer=0) 46

3.8.2.3 Générateur sinusoïdal (modPer=1) 47
3.8.2.3.1 Descripteur / Interface 47
3.8.2.3.2 Fonction réalisée 47
3.8.2.4 Générateur de peigne de Dirac 47
3.8.2.4.1 Descripteur / Interface 47
3.8.2.4.2 Fonction réalisée 47
3.8.2.5 Aperçu du générateur de fonction Gene_BF avant exécution 48
3.8.2.6 Enregistrement des paramètres du générateur GeneBF 48
3.8.2.7 Exemples d'application du perturbographe 49
3.8.2.7.1 Échelons de consigne de charge 49
3.8.2.7.2 Réponse de la régulation de vitesse à une sinusoïde additionnelle à la consigne de charge 50
3.8.2.7.3 Réponse de la régulation de vitesse à un peigne de Dirac sur la mesure de vitesse (réseau interconnecté) 50
3.8.2.7.1 Réponse du régulateur FR2 à un peigne de Dirac (10%) sur la charge (réseau interconnecté) 51
3.8.3 Perturbation complémentaire sur la consigne de charge dw3-tdw3 52
3.9 Loi de rendement REND en fonction de l'ouverture 52
3.10 Module de freinage CFRIC 54
3.11 Resynchronisation Sync de l'intégrateur vitesse 56
3.11.1 Principe d'activation 56
3.11.2 Relais de survitesse en déclenchement machine RDECL 57
3.11.3 Détecteur de stabilité du réseau - Bloc de reconditionnement de l'intégrateur Vitesse Sync1 59
3.11.4 Relais de resynchronisation Sync2 sur prise de charge – Accostage de la rampe de charge 62
3.12 Systèmes copiants SYSCOP (Vannage ou Injecteurs – Turbines Francis-Kaplan-Pelton) 65
3.12.1 Circuit oléohydraulique 65
3.12.2 Schéma de réglage 65
3.12.2.1 Turbines FRANCIS 65
3.12.2.2 Turbines PELTON axe horizontal ou vertical avec répartiteur de Jets en option 66
3.12.3 Réglage du PID Positionneur Francis-Injecteur 66
3.12.4 Réglage des temps de manœuvres des organes de réglage en ouverture et en fermeture par une loi LF multipente 67
3.12.5 Seuils de poursuite en grands mouvements du servomoteur 69
3.12.5.1 Seuils pour Turbines FRANCIS-PELTON 69
3.12.5.2 Seuil pour Turbines KAPLAN 70
3.12.6 Ouverture minimale du servomoteur lors d'un déclenchement du groupe avec retour en marche à vide 70
3.12.7 Mode Manuel 71
3.13 Système copiant SYSCOPD (Turbines PELTON - Déflecteurs) 73
3.13.1 Schéma de réglage 73
3.13.2 Réglage du PID Positionneur Déflecteur 73
3.13.3 Réglage des temps de manœuvre 73
3.13.4 Mode manuel Déflecteurs 74
3.13.5 Loi d'anticipation de fermeture des déflecteurs par anticipation sur l'erreur vitesse 74
3.13.6 Loi analytique de suivi de l'injecteur pilote 75
3.13.7 Correction de Puissance par le Déflecteur - Bloc PU_DEFL 76
3.13.7.1 Loi de conditionnement de l'intégrateur vitesse par le déflecteur ① 76

3.13.7.2 Évaluation du coefficient K_Def de pénétration du déflecteur dans le jet PELTON ② *77*
3.14 Système copiant SYSCOPP (Turbines KAPLAN - Pales) 79
3.14.1 Schéma de réglage 79
3.14.2 Réglage du PID Positionneur Pales 79
3.14.3 Seuils de détection de grand mouvement des Pales 79
3.14.4 Mode manuel des Pales 80
3.14.5 Réglage des temps de manœuvres Pales 80
3.14.6 Consignes de Prépositionnement des Pales 81
3.14.6.1 Schéma RDVS – PREPAL *81*
3.14.6.2 Paramétrage PREPAL *81*
3.14.6.3 Coefficient de déconjugaison des Pales *81*
4 LOIS DE LINEARISATION 82
4.1 Introduction 82
4.1.1 Prise en compte des relations de linéarités expérimentales 82
4.1.2 Simulation analytique et calculs des linéarités 84
4.2 Loi de linéarisation Puissance/Ouverture LPO 84
4.3 Loi de linéarisation Débit/Ouverture LQO 85
4.4 Lois différentielles en Débit et Chute DifQ-DifH 87
4.5 Loi de linéarisation Débit/Puissance LQP 88
4.6 Loi de linéarisation Chute/Ouverture LHO 89
4.7 Pertes de charge – Loi PdC 90
4.8 Tracé des lois de linéarisation dans la console Scilab – Instructions HydroSim 94
4.8.1 Présentation 94
4.8.2 Exemples de tracé de loi 95
4.9 Instruction « Interpoler » : rajout de points d'interpolation dans les lois de linéarisation 96
4.10 Calcul analytique des lois de linéarisation 96
4.10.1 Principe 96
5 PARAMETRES SPECIFIQUES AUX TURBINES PELTON – AXE HORIZONTAL OU VERTICAL - REPARTITEUR DE JET 97
5.1 Avant-propos 97
5.2 Principe du répartiteur de jets pour machines PELTON 97
5.2.1 Description générale 97
5.2.2 Validation paramétrable du répartiteur de jets 98
5.2.3 Sélection de l'injection pilote 99
5.2.4 Seuils de commutation des jets 99
5.2.5 Relais multivariable de commutation avec hystérésis RELAIS_H 

..... 100
5.2.6 Inhibition possible de séquences particulières 101
5.2.7 Fonction de répartiteur 

..... 102
5.2.8 Calcul des efforts radiaux sur la roue PELTON – Détection d'asymétrie 102

5.2.9 Sélecteur de jets PELTON 102
5.2.10 Principe du gain variable dans le positionneur des injecteurs PELTON 103
5.3 Intérêt économique d'un répartiteur de jets 104
6 COLLINES MACHINE 106
6.1 Généralités - Courbes caractéristiques à vitesse variable 106
6.2 Organisation 107
6.3 Démonstrateur d'un interpolateur sur un colline machine 109
6.4 Collines pour Machine Francis type FR4 110
6.4.1 Représentation dans le circuit TurbAdduc 110
6.4.2 Chargement des collines FR4 110
6.4.3 Format des collines FR4 111
6.4.4 Tracé des collines FR4 112
6.5 Collines pour Machine Francis type FR5 113
6.5.1 Représentation dans le circuit TurbAdduc 113
6.5.2 Chargement des collines FR5 113
6.5.3 Format des collines FR5 114
6.5.4 Tracé des collines FR5 115
6.6 Colline analytique pour Machine Kaplan KB1 116
6.6.1 Représentation dans le circuit TurbAdduc 116
6.6.2 Tracé de la colline KAPLAN 116
ANNEXE 117
A. ELEMENTS DE CALCUL DANS LE CIRCUIT HYDRAULIQUE – CALTUR EXCEL 117
B. REPARTITEUR DE JETS 118
B.1 Schéma du module REPARTITEUR 118
B.2 Étude économique d'un répartiteur de jets à l'usine de San Colombano (Italie) 119
B.3 Calcul des efforts sur une roue PELTON - Axe vertical 121
LISTE DES FIGURES 122

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, Flammation 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.

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

TABLE DES INDEX

A

ADirac 45
ADScope 107
ag_ 22
Allievi 22
ASinus 45
aut 44

B

bDelTx 17
bLOQ 86
bnkd 76
Bp 30
Bp2 32
bPertu 45
bRDECL 57
bReseau 43
bSync1 59
bSync2 62

C

c11 25
ce_ 17
ck_ 91
CManu 71
CManuDP 74
CourseSM 25
CourseSMP 25
CReseau 43
CV_Nom 40

D

DDirac 45
DeltaH 90
df1 41
df2 41
Dh_ 22
DifH 87
DifQ 87
Display_LINE 86
Dr_ 24
dw1 45
dw2 45
dw3 52

E

EchPos 71
eps 18

F

Formule de Colebrook-White 92
Formule de Darcy-Weisbach 91

G

g__ 17
ga_ 74
GeneBF 45
Generateur_Loi_Fermeture 67
Gi_ 66
GiP 79
GM 70

H

H0_ 89
hb 20
Head 20
Hini 87
Hnom 20

I

Inertie 23
inetot 23
IntercolKB 116
Interpoler 96
iPilote 99
iPilote2 99

K

Kd 30
KDecP 81
kFrein 54
kFric 54
Kp 27

L

Leq 21
LF_ 67
LFP_ 80
LHO 89
LODEM 42
Loi PdC 90
LOMAX 42
LOMIN 42
LORABT 42
LPO 84
LQO 85
LQP 88

M

MANU 71
ManuDP 74
ModAss 37
MoDECL 34
Modem 34
modPer 45
mu 17

N

n11 25
NJets 97
nkd 76
nq 17

O

o11 25
O11_nom 25
om0 23
Omav 26

P

P_RDECL 57
PDirac 45
PlotLF 68
Pnom 22
PosMini 70
PPal1 81
PPal2 81
PSinus 45
PW 22

Q

q11 25
Qini 85
Qnom 22

R

RampCont 40
RampGV 103
RDECL 58
Re_ 22
REND 52
RepOnOff 98
rho 17
Riso 35
rugo 18

S

s1a 74
s2a 74
SatPos 66
SatPosP 79
scm 69
scp 69
scpal 79
scv 70
SDirac 45
Seq 21
SFrein 54
SIntLL 33
skd 76
SLCom1 99
SLCom2 99
SLCom3 99
SLCom4 99
SLCom5 99
SLCom6 99
SPID 42
SRABT 42
StabH 59
StabL 59
SvOff1 57
SvOff2 59
SvOff3 59
SvOn1 57
SvOn2 59
SvOn3 59
Sync 56
Sync1 59
Sync2 62
SyncErr 57

T

Ta_ 23
TauH 87
Td 30
TDECL 34
tDepManu 71
tdf1 41
tdf2 41
tDirac 45
TDJF 33
tdw1 45
tdw2 45
tdw3 52
ti_ 66
Ti_ 27
tid 73
tiP 79
tj_ 66
tjd 73
tjP 79
Tky 32
tManu 71
tmfd 73
tmo 67
tmod 73
tmoP 80
tPilote 99
TPStab 59
TRamp 43
TRampF 40
TRiso 37
TSim 16
tSinus 45
TStart 33
Tw 22

V

V___ 22
Vn 22

W

wn 22

X

xLF 67
xRend 52

Y

yLF 67
yRend 52

1 INTRODUCTION

1.1 Documents disponibles

Titre du document
HYDROTUR – HydroSim - Guide d'installation et d'utilisation
HYDROTUR – HydroSim - Guide de programmation
HYDROTUR – HydroSim - Schémathèques des modèles et des circuits FRANCIS- KAPLAN - PELTON
HYDROTUR – HydroStab Solution - Études de stabilité des asservissements – Guide d'utilisation
HYDROTUR – HydroSim CALTUR- Calculation note CALTUR - Version 2.4 (en-fr) .xlsx
HYDROTUR – SEGPAL - Guide de référence – Bibliothèque additionnelle de composants XCOS

1.2 Modèles disponibles

Disponible ☐ Prévision

Type de turbine	Nom/Répertoire	Caractéristiques
FRANCIS	FR2	Turbine et conduite modélisées suivant des formules analytiques – Bélier d'onde
	FR4	Turbine et adductions modélisées à l'aide de collines machines, - Bélier de masse Interpolation et extrapolation sur le couple et le débit **(q11,c11)=F(N,O)**
	FR5	Turbine et adductions modélisées à l'aide de collines machines – Bélier de masse Interpolation et extrapolation sur le couple et le débit **(q11,c11)=F(Arctg(φ),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 déflecteur Déflecteur en suiveur de l'injecteur pilote Turbine et conduite modélisées suivant des formules analytiques – Bélier d'onde
	PELT2	Turbine PELTON axe horizontal, 2 injecteurs et 1 déflecteur Déflecteur en suiveur de l'injecteur pilote Turbine et conduite modélisées suivant des formules analytiques – Bélier d'onde
	PELT3	Pelton 3 jets axe vertical avec ou sans répartiteur de jets. Déflecteurs en suiveur de l'injecteur pilote Turbine et conduite modélisées suivant des formules analytiques – Bélier d'onde
	PELT4	Pelton 4 jets axe vertical avec ou sans répartiteur de jets. Déflecteurs en suiveur de l'injecteur pilote Turbine et conduite modélisées suivant des formules analytiques – Bélier d'onde
	PELT5	Pelton 5 jets axe vertical avec ou sans répartiteur de jets. Déflecteurs en suiveur de l'injecteur pilote Turbine et conduite modélisées suivant des formules analytiques – Bélier d'onde
	PELT6	Pelton 6 jets axe vertical avec ou sans répartiteur de jets. Déflecteurs en suiveur de l'injecteur pilote Turbine et conduite modélisées suivant des formules analytiques – Bélier d'onde
KAPLAN	KB1	Turbine et adductions modélisées à l'aide d'une colline analytique – Bélier de masse. Interpolation et extrapolation sur la moyenne géométrique Pales/Vannage et Vitesse. **(Couple réduit=** $F\left(N, \sqrt{P*V}\right)$**)** Conjugaison indirecte entre directrices et aubes

Figure 2 : Liste des modèles et algorithmes disponibles

1.3 Organisation du guide de programmation

1.3.1 Présentation générale

Dans la mesure du possible, les paramètres sont organisés par blocs fonctionnels et suivent approximativement la présentation édictée dans les fichiers de paramétrage au format Excel « **.xls** » ou les fichiers de configuration au format texte « **.cfg** »

Ainsi, chaque paramètre est encadré dans un bandeau indiquant son mnémonique, sa signification et son unité, ainsi que le nom du bloc fonctionnel ou le nom de fichier dans lequel il apparait.

Mémo désigne donc le nom du paramètre dans ces fichiers et dans les circuits de simulation.

Mémo	Signification du paramètre (unité utilisée)	Bloc fonctionnel

Les noms des blocs fonctionnels sont ceux utilisés dans les programmes de simulation XCOS, et leurs schémas fonctionnels ; ceux-ci sont rappelés dans tous les documents « **HydroSim – docs - TURBINES_Documentation».**

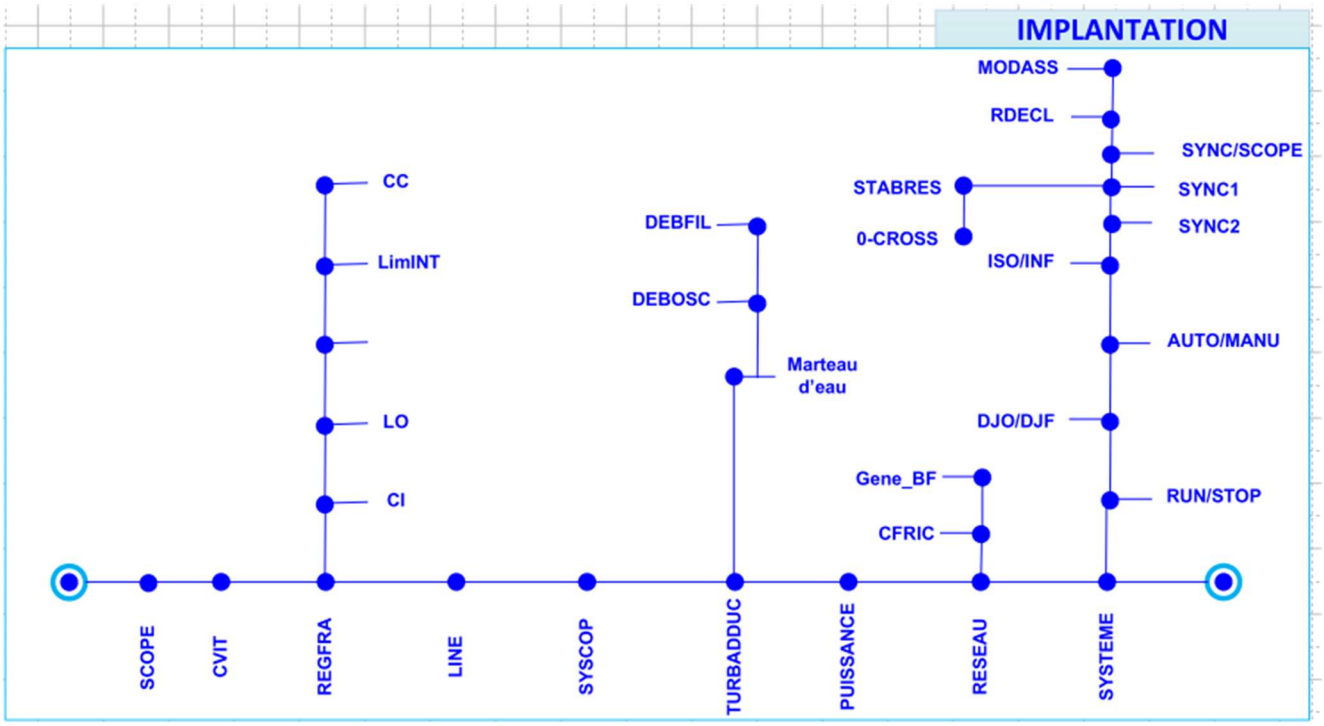


Figure 3 : Exemple de Blocs Fonctionnels – Schéma unifilaire du circuit FR5 avec Collines machine

1.3.2 À propos de la Table des Index

La Table des index fournit un accès rapide à la description d'un paramètre.

Dans cette table, les paramètres indiqués en bleu, caractères gras, ne sont pas des paramètres présents dans les fichiers de paramétrage, mais des paramètres calculés, en général, dans les calculs préliminaires (fichier « **.CTX** ») à charque circuit de simulation (*exemple : paramètre **ck_***, calculant la résistance hydraulique du circuit d'adduction, et présent par exemple dans le module **TURBADDUC** du circuit **FR2**)

2 STRUCTURE DE PARAMETRAGE DES SIMULATEURS

2.1 Structure d'un répertoire

En dehors des fichiers propres à la simulation d'une machine (voir *Figure 2*), situés dans le répertoire **HydroSim\TURBINES**, chaque simulateur, pour un site donné, doit disposer d'un ensemble de fichiers caractérisant son paramétrage afin de pouvoir lancer une simulation :

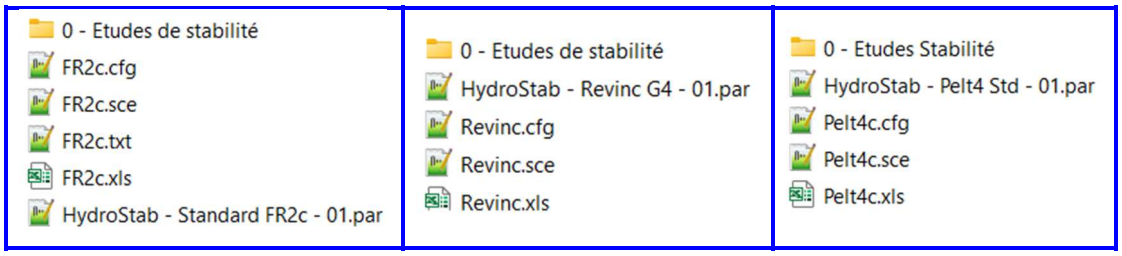


Figure 4 : Structure de paramétrage des simulateurs

Ces structures sont disponibles dans les sous-répertoires **HydroSim\demos**.

- Un fichier « XLS » contient des paramètres constants pour un site donné. En général, ce fichier doit être défini une seule fois, et doit rester invariant dans toutes les simulations, quelle que soit la séquence engagée (démarrage du groupe, échelons de charge, délestage de charge, …etc)

- Le fichier « TXT » est un fichier texte optionnel, contenant tous les paramètres de simulation. Il est produit en début de simulation si et seulement si le paramètre bDelTx=0 dans le fichier **« VariablesGlobales.sce ».** (*voir bDelTx dans l'index*)

- Le fichier « SCE » lance une simulation :
  - Cliquer sur un fichier « SCE » dans la fenêtre « **SciNotes** », puis lancer l'exécution du fichier avec l'outil correspondant de Scilab :
  - 

L'exécution du fichier « SCE » provoque dans un premier temps l'apparition de la fenêtre « HydroSim RUNNER », proposant un ensemble de menus :

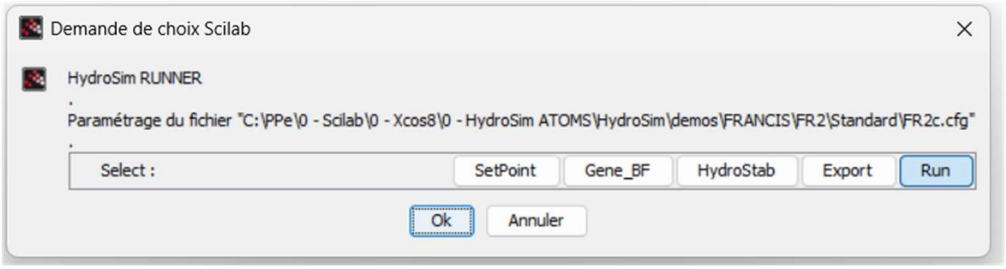


Figure 5 : Fenêtre "HydroSim RUNNER" au lancement d'un fichier "SCE"

Valider ensuite un choix avec la touche OK.

- Le menu **SetPoint** fixe les points de fonctionnement d'une simulation (Consigne de fonctionnement, mode réseau isolé/séparé, …etc). (*Voir §3.7.1*)

- Le menu **Gene_BF** initialise le perturbographe mis en œuvre dans le folio « Reseau » de toutes les schémathèques. Ce dispositif permet d'évaluer la qualité et la robustesse du simulateur suite à des stimuli sur la boucle fréquence ou puissance (*Voir §3.8.2, Figure 61*)

➢ Le menu **HydroStab** sélectionne dans le fichier « *HydroStab - xxx.par* » du répertoire une méthode de simulation parmi celles expérimentées par l'utilisation dans une session HydroStab. (*Voir § 3.4.3*)

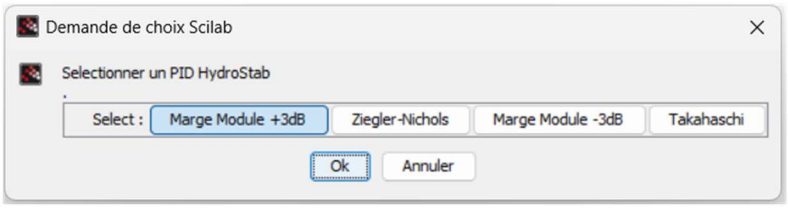


Figure 6 : Menu HydroStab - Sélection d'une méthode d'optimisation

➢ Le menu **Export** exporte une configuration de simulation dans un répertoire à sélectionner. Cet outil est réservé au développement.

- Le fichier « *HydroStab - xxx.par* » est un fichier de sauvegarde généré par l'opérateur lors d'une session **HydroStab. Il** contient l'ensemble des données hydrauliques de la machine, les méthodes utilisées par l'opérateur, et les réglages des PID vitesse associés.

  Lors d'un enregistrement dans un session **HydroStab**, il est préférable de réaliser la séquence d'enregistrement dans un répertoire commun avec **HydroSim,** comme indiqué en *Figure 4* (*Voir aussi §3.4.3*).

- Le fichier « CFG » est un fichier texte éditable, et contient l'ensemble des données enregistrées avec HydroSim RUNNER.

  Ce fichier est chargé, lors d'un lancement d'une session de simulation par **HydroSim RUNNER➔Run➔OK**, après le chargement du fichier « XLS ». En conséquence, les paramètres communs aux fichiers XLS et CFG sont surchargés.

2.2 Séquences spéciales de test hors HydroSim-RUNNER

2.2.1 Généralités

Il peut être nécessaire de rajouter des paramètres dans le fichier « CFG » pour réaliser certaines séquences non programmables directement après l'utilisation du RUNNER.

Dans ce cas :

- Sélectionner les paramètres concernés dans le fichier « XLS »
- Copier et Coller ces paramètres en fin du fichier « CFG »
- Programmer ces paramètres à la valeur escomptée
- Sauvegarder le fichier CFG
- Lancer la simulation

☞ **Supprimer par la suite les paramètres additionnels pour réaliser une nouvelle suite de test**

2.2.2 Examples of special sequences

2.2.2.1 Atténuation des oscillations conduite lors d'une séquence de délestage du groupe hydraulique

Les oscillations conduite peuvent être amorties en programmant une ouverture non nulle de du cercle de vannage d'une machine FRANCIS. Ce dispositif est possible en utilisant le paramètre **PosMini**.

On programme d'abord une séquence de délestage en utilisant à cet effet **HydroSim➔SetPoint**, puis on rajoute le paramètre PosMini en fin du fichier HydroSim\demos\FRANCIS\FR2\Standard\FR2c.cfg.

On obtient alors les simulations sauvegardées dans le répertoire HydroSim\demos\FRANCIS\FR2\Standard\0 - Etudes de stabilité\Déclenchement - Pn= 90%.

Le lecteur pourra consulter les fichiers « CFG » et « SCG » sauvegardés dans ce répertoire

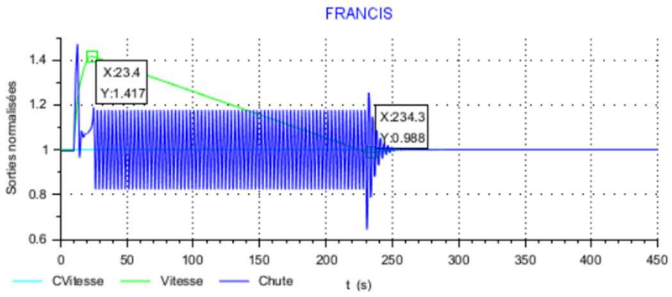


Figure 7 : Fichier HydroSim\demos\FRANCIS\FR2\Standard\0 - Etudes de stabilité\Déclenchement - Pn= 90%\03_Francis -- FR2c - Declenchement - Pn= 90% - PosMini=0.00.scg

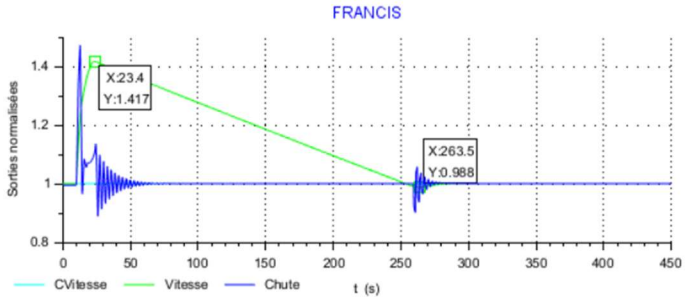


Figure 8: Fichier HydroSim\demos\FRANCIS\FR2\Standard\0 - Etudes de stabilité\Déclenchement - Pn= 90%\02_Francis -- FR2c - Declenchement - Pn= 90% - PosMini=0.01.scg

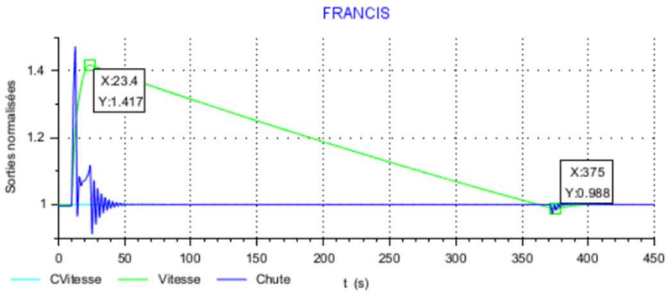


Figure 9: Fichier HydroSim\demos\FRANCIS\FR2\Standard\0 - Etudes de stabilité\Déclenchement - Pn= 90%\01_Francis -- FR2c - Declenchement - Pn= 90% - PosMini=0.02.scg

3 GUIDE DE PROGRAMMATION

3.1 Sélection de solvers – Solver RUNGE-KUTTA

Xcos propose une liste conséquente de solvers, disponible et accessible dans le menu de configuration :

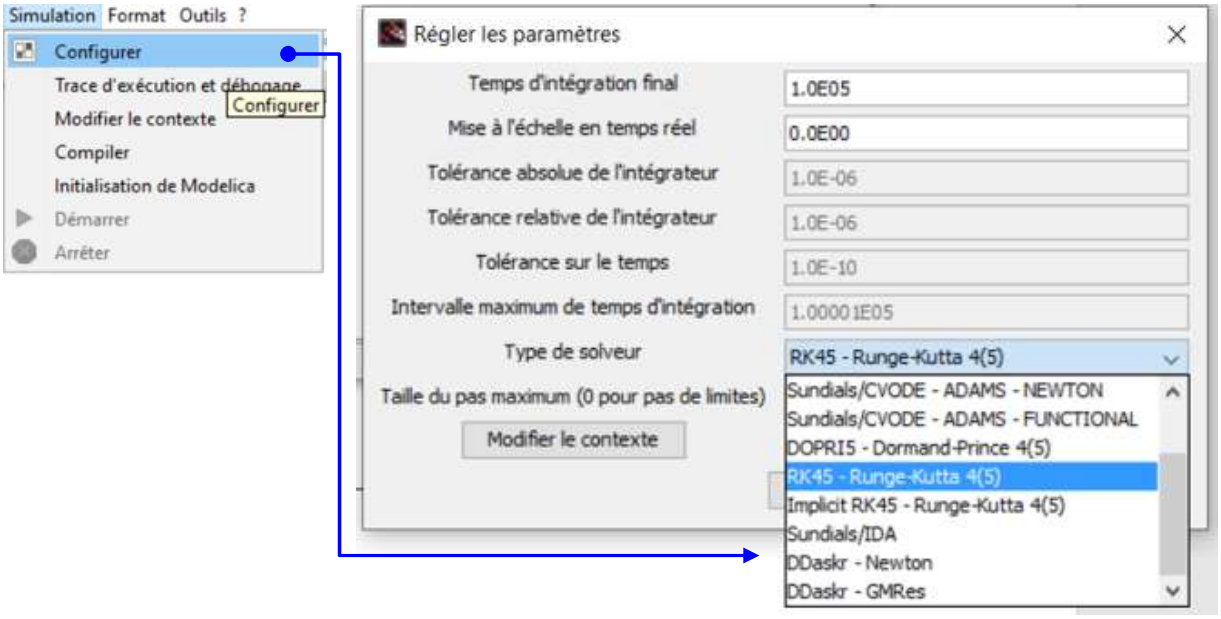


Figure 10 : Sélection du solver **RUNGE-KUTTA** sous XCOS

Historiquement, l'ensemble des circuits de simulations ont été testés en utilisant le solver CVCODE NEWTON **à pas variable** :



Puis, le solver 

, **à pas fixe**, donne des précisions équivalentes, avec une vitesse de convergence beaucoup plus efficiente. Ce dernier solver est donc retenu pour l'ensemble des circuits développés sous HYTDROTUR.

En cas de doute sur les simulations, revenir vers le serveur NEWTON.

Le lecteur obtiendra de informations plus développées en lançant à la console :

➔ **doc Solvers**

Des renseignements sur les solvers XCOS peuvent aussi être visualisés sur le site WEB :

https://help.scilab.org/docs/5.5.2/en_US/Comparisons.html

3.2 Paramètres de simulation XCOS

TSim	Durée de la simulation (s)	Module principal - SetPoint

TSim définit le temps demandé pour la durée de la simulation. Celui-ci paramètre ainsi :

- Tous les oscilloscopes ou enregistreurs présents dans les schémathèques (folio Scope) dans les schémathèques)



- La boîte fonctionnelle END 

présente dans le programme principal de chaque simulateur et modèle de turbine.

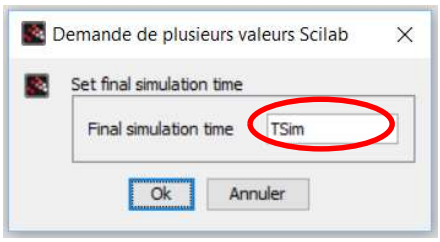


Figure 11 : TSim : Réglage du temps de simulation

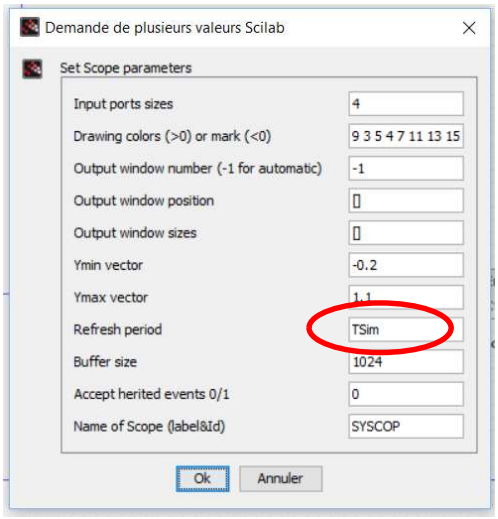


Figure 12 : Durée de vie des oscilloscopes numériques

Le simulateur prend en compte le « temps d'intégration final » défini dans l'élément de configuration du menu de simulation à partir du temps inscrit dans ce champ de la boîte de dialogue.

Ce paramètre est une valeur numérique ou une variable symbolique définie dans le contexte XCOS.

La durée du temps TSim doit être normalement inférieure à la valeur par défaut définie dans la boîte de réglage des paramètres de simulation (10^5 s). Il n'est donc pas nécessaire d'accéder à cette instance, ce qui évite tout dérèglement de celle-ci (Temps d'intégration final) :

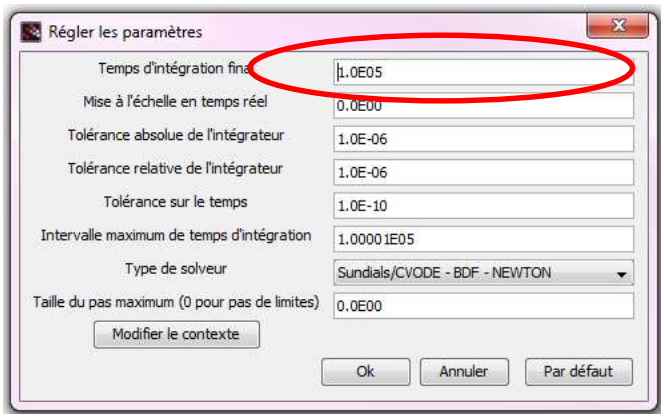


Figure 13 : Boîte de réglage des paramètres de simulation

TSim peut être ajusté en fonction des séquences à simuler :

- Fonctionnement en mode positionneur
- Démarrage turbine et couplage au réseau électrique
- Séquence groupe couplé avec perturbation de la charge réseau et délestage du groupe, avec retour en marche à vide ou arrêt machine
- …etc.

Remarques

Chaque programme de simulation est lancé à partir d'un fichier ***.sce*** (terminologie Scilab), et comprend un jeu d'instruction ***tic()*** et ***toc()*** permettant de renseigner la durée totale effective de la simulation. Cette information s'affiche en fin de simulation dans la console Scilab.

Exemple :

```
Durée de la simulation : 41.9 s
-->
```

Figure 14 : Affichage de la durée de la simulation dans la console Scilab

bDelTxt	Maintien (0) ou Suppression (1) des fichiers temporaires de paramétrage au format .TXT	macros\VariablesGlobales.sce

La procédure de chargement d'un fichier de paramétrage au format .XLS, lors de l'exécution d'un modèle, produit un fichier temporaire homonyme au format texte « .txt ». Le paramètre bDelTxt permet le maintien ou la suppression du fichier « txt » pour utilisation dans des moteurs de recherche (WinMerge par exemple). **Ce paramètre est accessible dans le fichier « VariablesGlobales.sce ».**

3.3 Constantes

g	Accélération de la pesanteur ($m.s^{-2}$)	XLS

☞ Sauf indication contraire, g=9.81 $m.s^{-2}$

ce_	Célérité des ondes (m/s)	XLS

☞ Sauf indication contraire, ce=1000 m/s

rho	Masse volumique de l'eau ($Kg.m^{-3}$)	XLS

☞ Sauf indication contraire, rho=1000 $kg.m^{-3}$

mu	Viscosité dynamique de l'eau (Pa.s)	XLS

☞ Sauf indication contraire, mu=$1e^{-6}$ Pa.s

nq	Coefficient d'adaptation Ouverture/Débit (su)	TURBADDUC (sans colline). XLS

nq est un coefficient empirique pour représenter la relation non linéaire entre le débit Q et l'ouverture O : $Q = O^{nq}$

☞ Sauf indication contraire, nq=0.7.

Ce dispositif est utilisé dans la simulation du bloc Turbine+Adduction TURBADDUC des circuits FR2, PELT1, PELT6, ou chaque fois que les collines machines ne sont pas connues (*circuits FR2, PELTON*)

->nq=0.7 ; x=0 :0.01 :1 ; y=x^nq ; plot2d(x,y) ; plot2d(x,x) ; xgrid ; // Programme Scilab

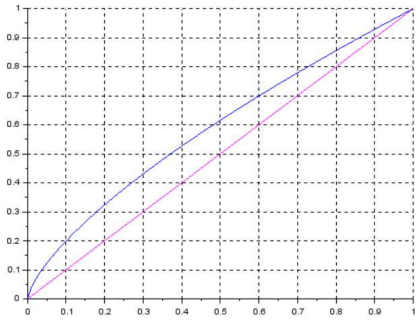


Figure 15 : Loi Débit/Ouverture par défaut $Q=O^{nq}$

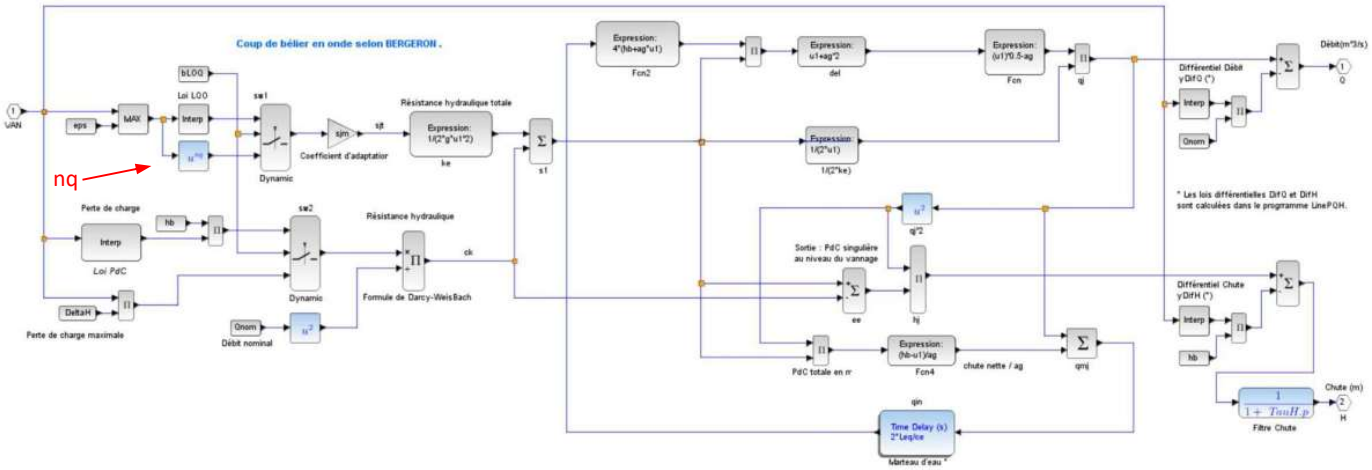


Figure 16 : Bloc "Turbine+Adduction" TURBADDUC du circuit FR2

rugo	Rugosité de la conduite (m)	XLS

☞ Sauf indication contraire, rugo=5.e^{-7} m.

La valeur du paramètre *rugo* est contenue dans l'intervalle de rugosité des conduites en acier (dans le tableau, "conduites en acier, bouts soudés, intérieur continu").

La rugosité intervient dans les calculs préliminaires, pour trouver le coefficient de frottement de la conduite (Voir ***Formule de Colebrook-White).*** Ce dispositif caractérise les pertes de charges des pertes linéaires dans l'écoulement du circuit hydraulique.

☞ Voir aussi paramètre **DeltaH**, ***Figure 171***

eps	Constante (su)	XLS

☞ eps=10^{-10}. Valeur « Epsilon » utilisée en particulier dans les hystérésis.

Noter que la représentation d'epsilon en Scilab se note %eps et peut être visualisé à la console : %esp=2.22.10^{-16}.

Néanmoins %eps peut, dans certains calculs, apporter des instabilités, et on préfèrera la constante HydroSim **eps**.

3.4 Paramétrage du circuit hydraulique et de la machine avec HydroStab

3.4.1 Utilisation du programme HydroStab dans la fourniture HydroSim

Le calculateur **HydroStab** se propose de calculer le réglage d'un correcteur de vitesse de type PID simplifié, à partir des données décrivant un circuit hydraulique.

Ce programme 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**.

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

L'objectif est de contraindre la **F**onction **D**e **T**ransfert en **B**oucle **O**uverte (FTBO régulateur + procédé) à passer par un point P imposé dans le plan de plan de Nyquist.

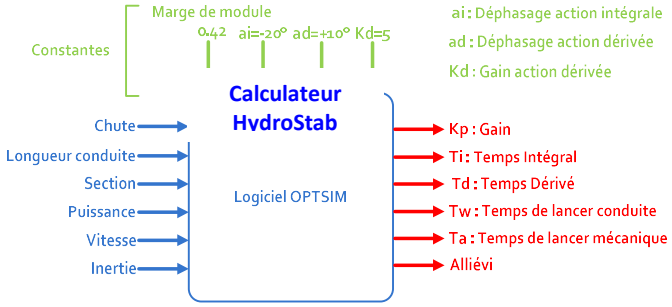


Figure 17 : Calculateur HydroStab - Calcul des paramètres PID en boucle ouverte

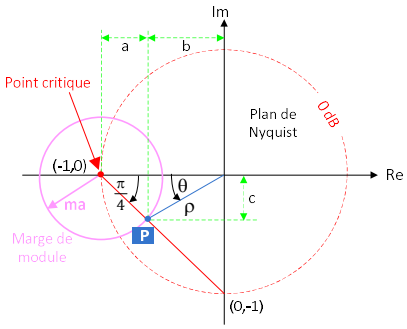


Figure 18 : Marge de module dans le plan de Nyquist

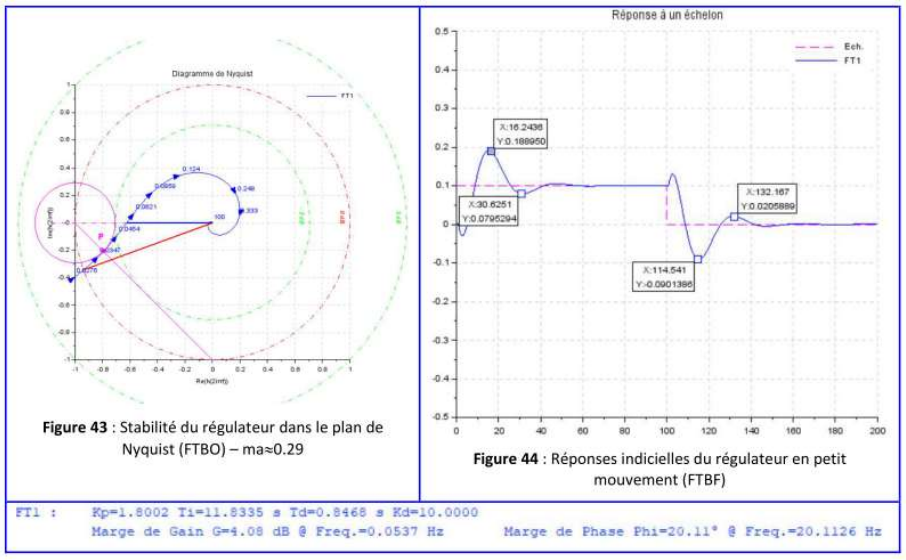


Figure 43 : Stabilité du régulateur dans le plan de Nyquist (FTBO) – ma≈0.29

Figure 44 : Réponses indicielles du régulateur en petit mouvement (FTBF)

Figure 19 : Méthode de réglage du PID Vitesse par la marge de module dans le plan de Nyquist

☞ Noter qu'HydroStab propose également une autre méthode de calcul basée sur la théorie de **Ziegler et Nichols**, par oscillation de la fonction de transfert du procédé simplifié en boucle fermée, et déduction des paramètres de stabilité du régulateur

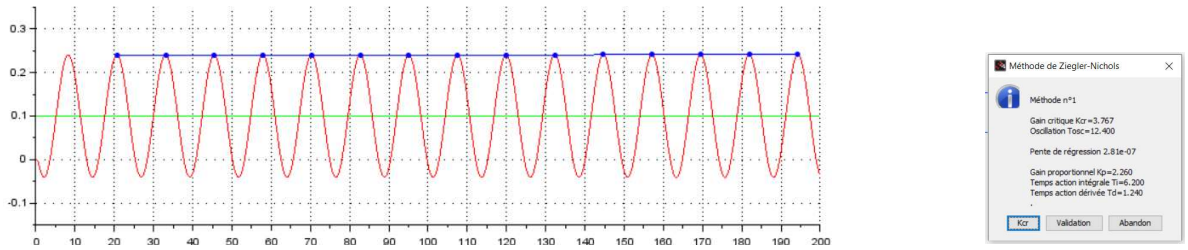


Figure 20 : Réglage du PID Vitesse par la méthode de Ziegler-Nichols

Le lecteur se réfèrera au document « HYDROTUR - HydroStab Solution - Études de stabilité des asservissements ». Ces documents sont accessibles dans le module ATOMS HydroStab[1].

Par la suite, d'autres méthodes pourront être implantées sans reprise de ce document

3.4.2 Données pour le calculateur HydroStab

Les données ci-dessous sont à enregistrer, dans **HydroStab,** dans le fichier de paramétrisation « .**par**» de l'usine et du groupe étudié.

[1] Taper « -> atomsInstall("HydroStab")» dans la console Scilab pour télécharger ce module.

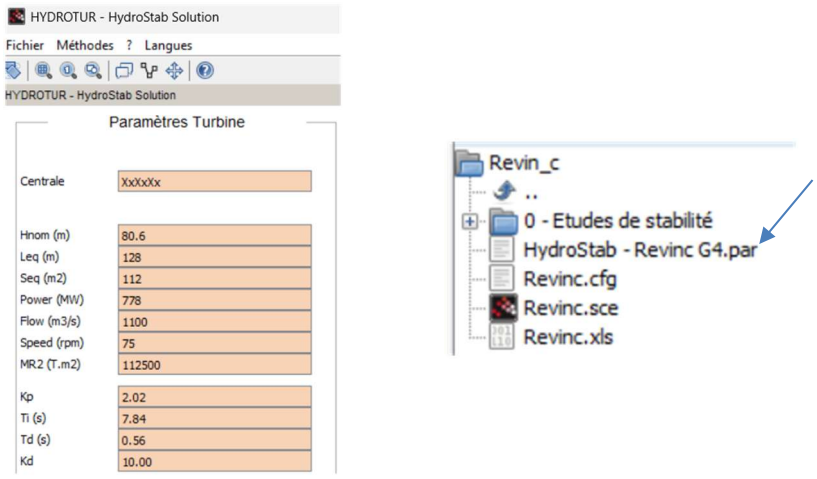


Figure 21 : Récupération des données de HydroStab dans un répertoire HydroSim

Head **Hnom**	Hauteur de chute (m)	HydroStab

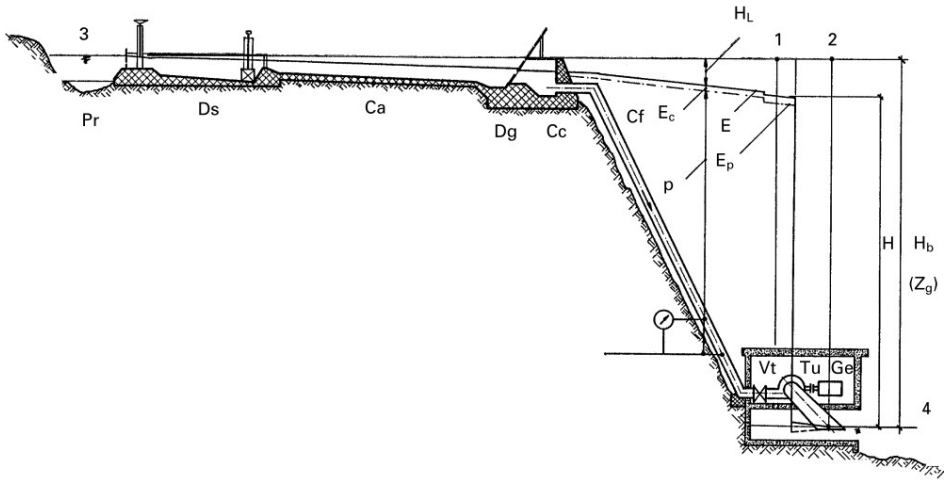
Ce paramètre crée la variable interne **hb**=Head.

Dans les nouvelles versions, la hauteur de chute est plutôt notée **Hnom**.

On distingue, dans la terminologie :

- La chute brute : différence de niveau d'eau entre le bassin supérieur et le bassin inférieur
- La chute nette : différence de pression d'eau aux "bornes" de la turbine, c'est-à-dire entre sortie de bâche et entrée d'aspirateur pour des turbines Francis, Kaplan ou bulbe, ou entre entrée d'injecteur et pression atmosphérique pour une turbine Pelton

La différence entre les 2 chutes représentante les pertes de charge dans le circuit hydraulique, mais cet écart n'est cependant pas significatif dans le cadre des simulations envisagées (généralement 2%).



Pr : prise d'eau
Ds : dessableur
Ca : canal/conduite d'amenée
Dg : dégrilleur
Cc : chambre de mise en charge
Cf : conduite forcée
Vt : vanne turbine
Tu : turbine
Ge : générateur

1 : point de référence amont de la turbine
2 : point de référence aval de la turbine
3 : point de référence amont de l'aménagement
4 : point de référence aval de l'aménagement
E : ligne d'énergie
E_c : énergie cinétique
E_p : énergie de pression
p : pression
H_b : chute brute
H : chute nette

Figure 22 : Composants et profil en long d'une petite centrale hydraulique

Leq	Longueur conduite équivalente (m)	HydroStab
Seq	Section conduite équivalente (m^2)	HydroStab

Il est recommandé de consulter les experts hydrauliciens pour obtenir les données d'entrées Leq et Seq.

À défaut, on peut également utiliser, dans les cas simples, les documents suivants, fournis dans la suite logicielle HYDROTUR.

Voir aussi

Document **HydroSim \ CALTUR\Calculation note CALTUR - Version 2.4 (en-fr) .xlsx**

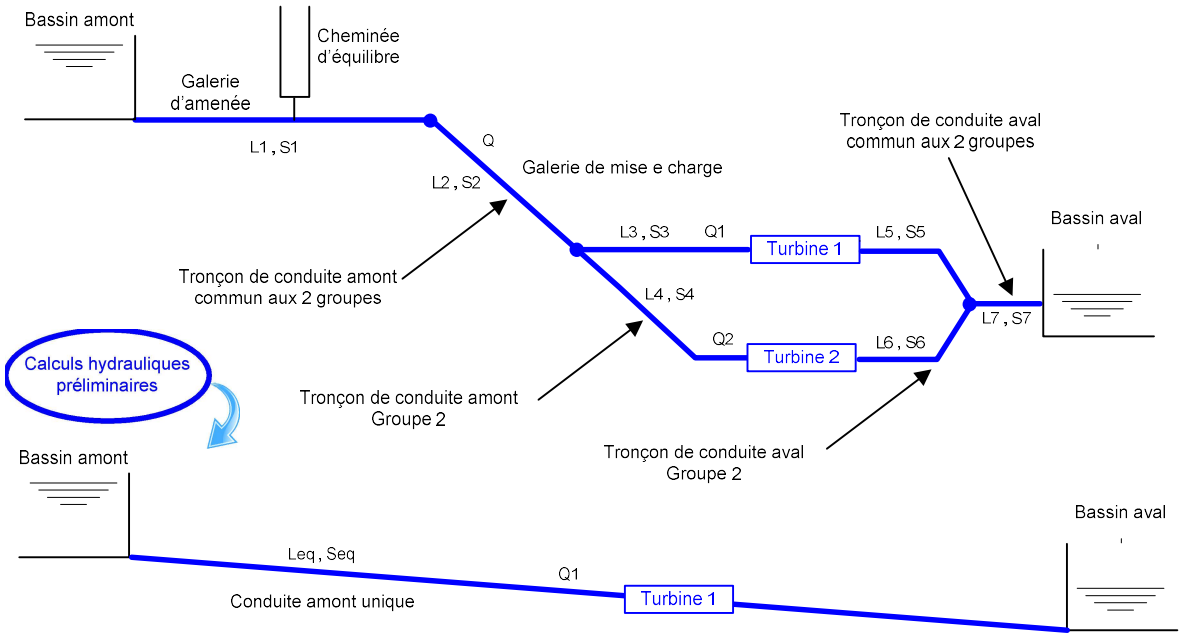


Figure 23 : Calcul préliminaire à l'étude de stabilité d'un groupe hydraulique

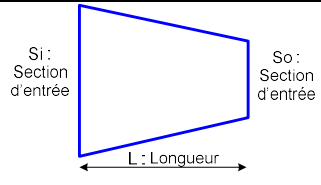
Le calculateur **HydrpStab** utilise un modèle simplifié, déduit d'une étude préliminaire du circuit hydraulique.

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 :

	$S = \sqrt{Si * So}$

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.
- **Dh** : $Dh = \sqrt{\frac{4 * Seq}{\pi}}$ (m) **Diamètre hydraulique**
- Le nombre de Reynolds, à titre indicatif, **Re :** $\mathrm{Re} = \frac{2 * rho * Qnom}{mu\sqrt{\pi * Seq}}$ ou bien $\mathrm{Re} = \frac{V * rho * D_h}{mu}$

, formule dans laquelle désigne **V___** la vitesse moyenne de l'eau : $V = \frac{Qnom}{Seq}$

Pnom **PW**	Puissance nominale de la machine (MW)	HydroStab

Pnom (ou PW) désigne normalement la puissance mécanique fournie par la turbine à pleine ouverture et à vitesse nominale sous la chute brute nominale.

Remarques

Un litige peut être fait entre puissance mécanique et puissance électrique, mais cette confusion ne correspond qu'à une différence de l'ordre de 2 % sur le rendement au point nominal (rendement alternateur ≈ 98 %). Comme ce rendement n'est généralement pas connu (modernisations, réhabilitations) et qu'il n'influe pas sur le comportement dynamique, cette approximation reste légitime.

Dans tous les cas, une vérification est possible si le débit nominal est fourni :

$$W = \eta.\rho.g.H.Q$$

avec W = puissance mécanique de la turbine (kW), η = rendement de la turbine (≈90 %), ρ = masse volumique de l'eau = 1 t/m³, g = 9.81 m/s², H = chute nette nominale (m), Q = débit nominal Qnom (m³ /s).

Ce paramètre crée les variables internes :

- **wn** : $wn = PW * 10^6$ (W)
- **Tw** : $Tw = Qnom * Leq / (1. * g * hb * Seq)$ (s) **Temps de lancer hydraulique**
- Le paramètre d'**Allievi**, à titre indicatif : $Allievi = \frac{Tw * ce}{2 * Leq}$

Qnom	Débit nominal (m³/s)	HydroStab

Cette donnée doit être renseignée par l'opérateur.
Lorsqu'elle n'est pas connue, elle peut être approximée par la relation :

$$Qnom = wn / (1. * rho * g * hb)$$

Vn	Vitesse nominale de la machine (rpm)	HydroStab Reseau

Cette donnée est en général disponible sur la plaque signalétique de la turbine (réhabilitation)



Figure 24 : Exemple de plaque signalétique accolée à la turbine

Ce paramètre crée la variable interne **om0** : $om0 = Vn * 2 * \pi / 60 \ (rd/s)$

Inertie	Inertie des masses tournantes Turbine + Alternateur (T.m²)	Reseau HydroStab

L'inertie conditionne la réponse en régime transitoire du groupe : sur une demande de puissance électrique, tant que l'organe de réglage n'a pas compensé cette demande par une ouverture adaptée, l'énergie nécessaire absorbée par le réseau est prise sur l'énergie cinétique du groupe, et se traduit par un ralentissement d'autant plus rapide que l'inertie est faible.

Remarques

En physique, le moment d'inertie d'une masse tournante est défini comme étant MR², où M est la masse en rotation et R le rayon du centre de gravité.

Malheureusement, chez les mécaniciens, on préfère utiliser le "PD²", où P est le poids et D le diamètre. La notion de poids est déjà une erreur dans la mesure où le poids est lié à l'environnement (attraction de la pesanteur) et dépend donc théoriquement du lieu, alors que l'inertie est une donnée intrinsèque.

De plus, la référence au diamètre donne un rapport 4 entre inertie et PD², d'où risque d'erreur grossière.

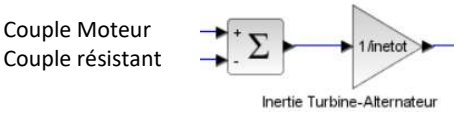
Il faut donc très soigneusement vérifier cette donnée avant de l'utiliser dans une simulation :

- Si l'information donnée est explicitement le PD², calculer l'inertie = PD²/4
- S'il y a le moindre doute, procéder de la manière suivante :
  - ✓ Calculer le temps de lancer mécanique **Ta** : $T_a = \frac{I\omega^2}{W_n}$

    où I est l'inertie en kg.m², ω la vitesse de rotation en rd/s, et Wn la puissance nominale en W.

    Ta est alors exprimé en s.
  - ✓ Si Ta est approximativement compris entre 5 et 15 s, l'inertie est probablement exacte, si Ta est supérieur à 20 s, il y a toute probabilité pour que la donnée fournie soit le PD² et non l'inertie.
  - ✓ Si Ta est inférieur à 5 s, il est possible que la donnée fournie (inertie ou PD²) soit celle de la turbine et non de celle de l'ensemble des parties tournantes
  - ✓ Dans un groupe hydro-électrique, l'essentiel de l'inertie provient de l'alternateur, la turbine ne représentant que 10 % environ de l'inertie totale. Si, à la limite, on ne dispose pas de l'inertie turbine, on peut prendre pour l'inertie groupe : inertie alternateur x 1,1.

Ce paramètre crée la variable interne **inetot** : $inetot = Inertie * 1000 \ (kg.m^2)$, variable utilisée dans le **module Réseau** des modèles, après le calcul du différentiel Couple Moteur – Couple résistant :



3.4.3 Récupération des données HydroStab dans HydroSim

Les simulations conduites sous HydroStab doivent être **obligatoirement** enregistrées dans un fichier « HydroStab – xxxx - yz.par » dans le même répertoire que les fichiers utiles au lancement de la simulation HydroSim.

Par exemple, dans le cas de la simulation de la machine FR2, on trouvera dans le répertoire HydroSim\demo\FRANCIS\FR2\Standard, les fichiers :

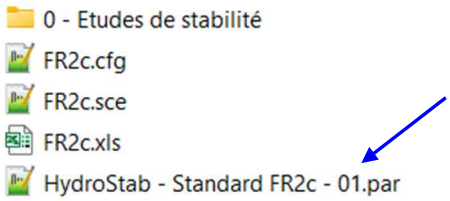
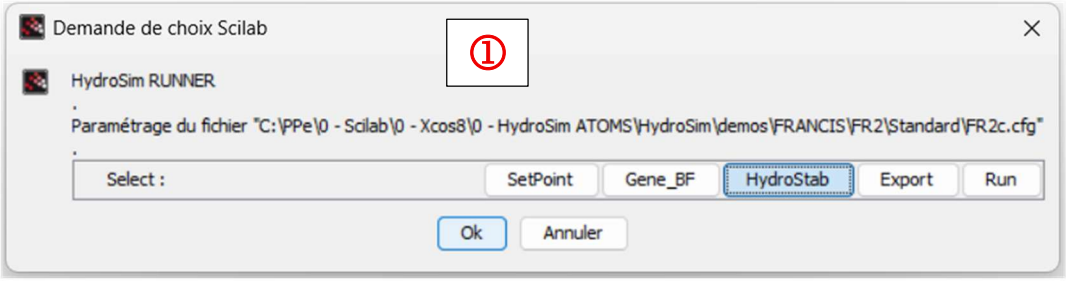


Figure 25 : Fichier HydroStab dans la simulation de la machine FR2

Pour lancer une simulation avec les paramètres de stabilité souhaités, il faut au préalable lancer **HydroSim RUNNER** en exécutant le fichier SCE dans ce répertoire. On obtient ainsi la liste de choix associée ① :



En validant le choix HydroStab par la touche OK, on obtient une nouvelle liste de choix entre les différentes méthodes enregistrées dans le fichier « HydroStab – xxxx - yz.par » ②

Sélectionner alors une méthode, puis valider avec la touche OK

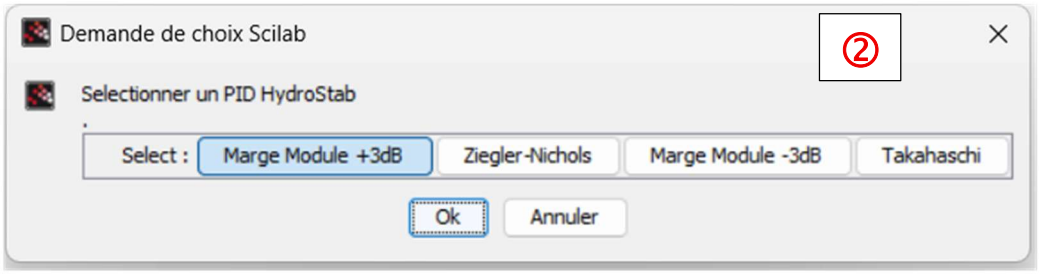


Figure 26 : Récupération des données HydroStab dans HydroSim

☞ **Les données de la machine hydraulique simulée, et de réglage du PID vitesse sont alors recopiées dans le fichier CFG du répertoire.**

3.4.4 Autres paramètres

Dr	Diamètre en sortie de la roue (m)	FR4/ FR5 XLS

Cette donnée est une caractéristique hydraulique de la machine et permet de vérifier la cohérence des données en recalculant puissance, débit et chute.

Remarques

Dr est une donnée explicitement utilisée dans le bloc « Turbine + Adduction » TURBADDUC, des circuits élaborés avec une colline machine (circuits FR4, FR5, ...)

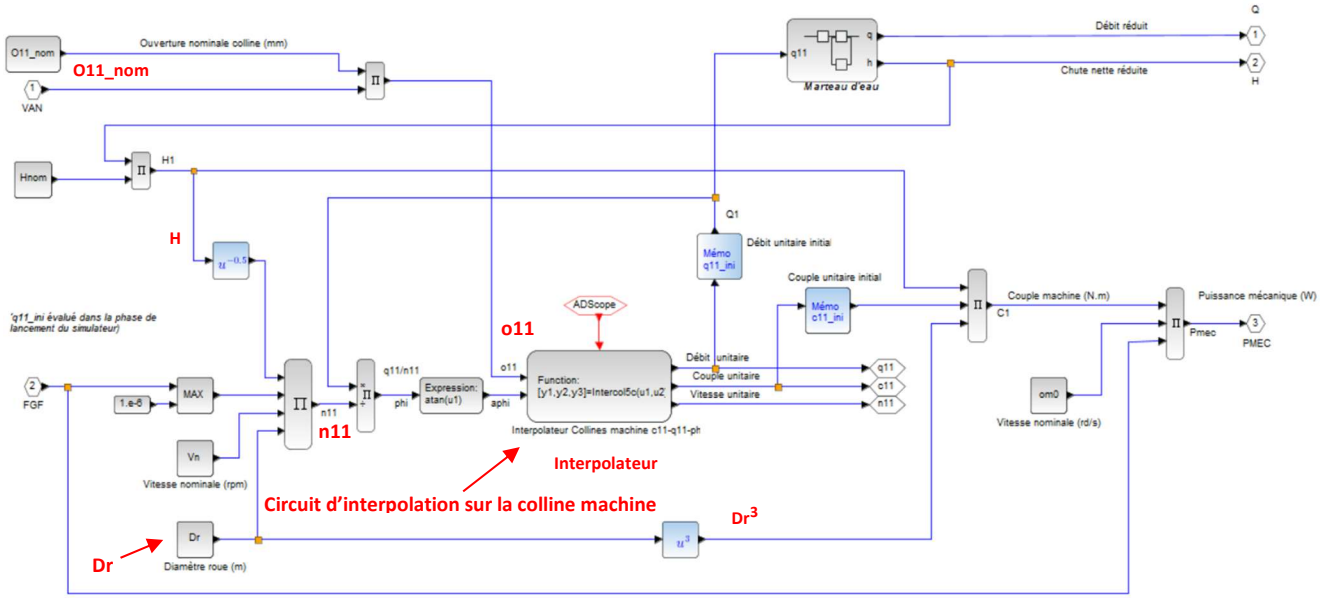


Figure 27 : Circuit « Turbine + Adduction » de l'algorithme **FR5** avec Colline machine et Interpolateur

Ce circuit[2] utilise une colline machine, et l'algorithme d'interpolation utilise en entrée la vitesse réduite machine **n11**, et fournit en sortie, le débit réduit **q11**, le couple machine réduit **c11**.

☞ ***Les formules manipulant ces données sont rappelées au Chapitre 6***

Dans le schéma présenté ci-dessus en *Figure 27*, la donnée **O11_nom** (mm) est calculée automatiquement par H, dans la phase de chargement de la colline machine. Elle correspond au maximum d'ouverture défini dans la colline, et permet la normalisation de l'ouverture **o11(su)** avant la sollicitation de de l'interpolateur sur la colline, de telle sorte que

$$o_{11} = VAN.O_{11}_nom$$ où VAN est la sortie du bloc SYSCOP exprimée en coordonnées réduites.

CourseSM	Course maximale servomoteur Vannage ou Injecteur (mm)	XLS
CourseSMP	Course maximale servomoteur des Pales (mm)	XLS

Ces paramètres sont principalement utilisés dans le tracé des lois de linéarité des données d'entrées (instructions PlotP, PlotQ, PlotH,….etc) pour présenter les axes des x en coordonnées utilisateur.

[2] *Voir aussi chapitre 6.5*

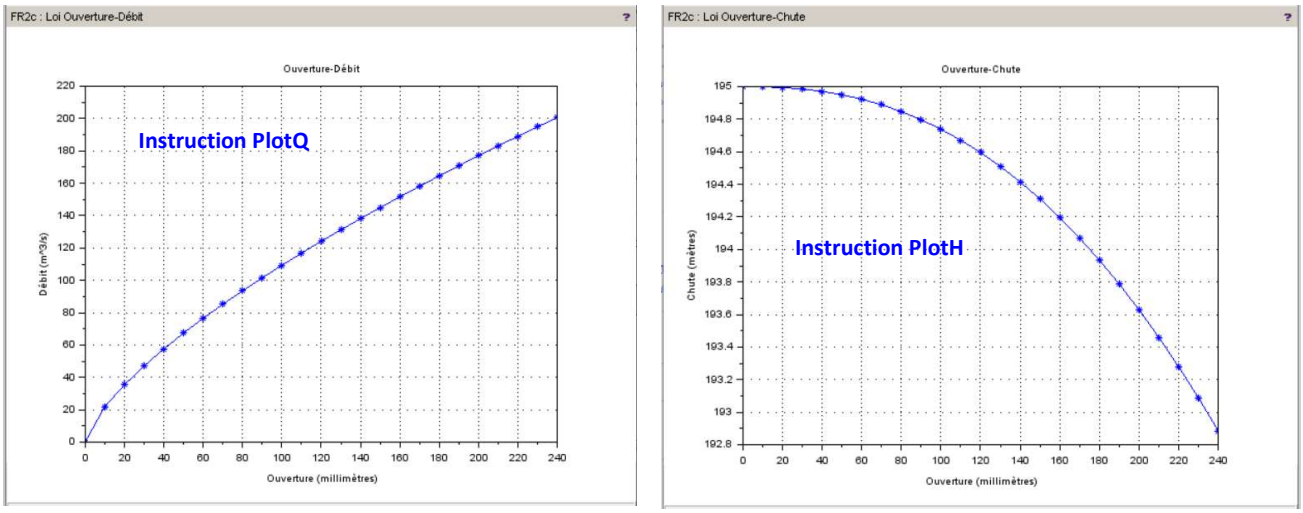


Figure 28 : Exemple d'utilisation du paramètre CourseSM=240mm

Omav	Ouverture de marche à vide (mm)	XLS

Deux cas de figure se présentent :

1. Si bLOQ=1, Omav représente effectivement l'ouverture de marche à vide estimée, exprimée en millimètres.

   Si la donnée n'est pas connue, elle peut éventuellement se déduire de l'enregistrement d'une séquence de déclenchement type DE du groupe hydraulique.

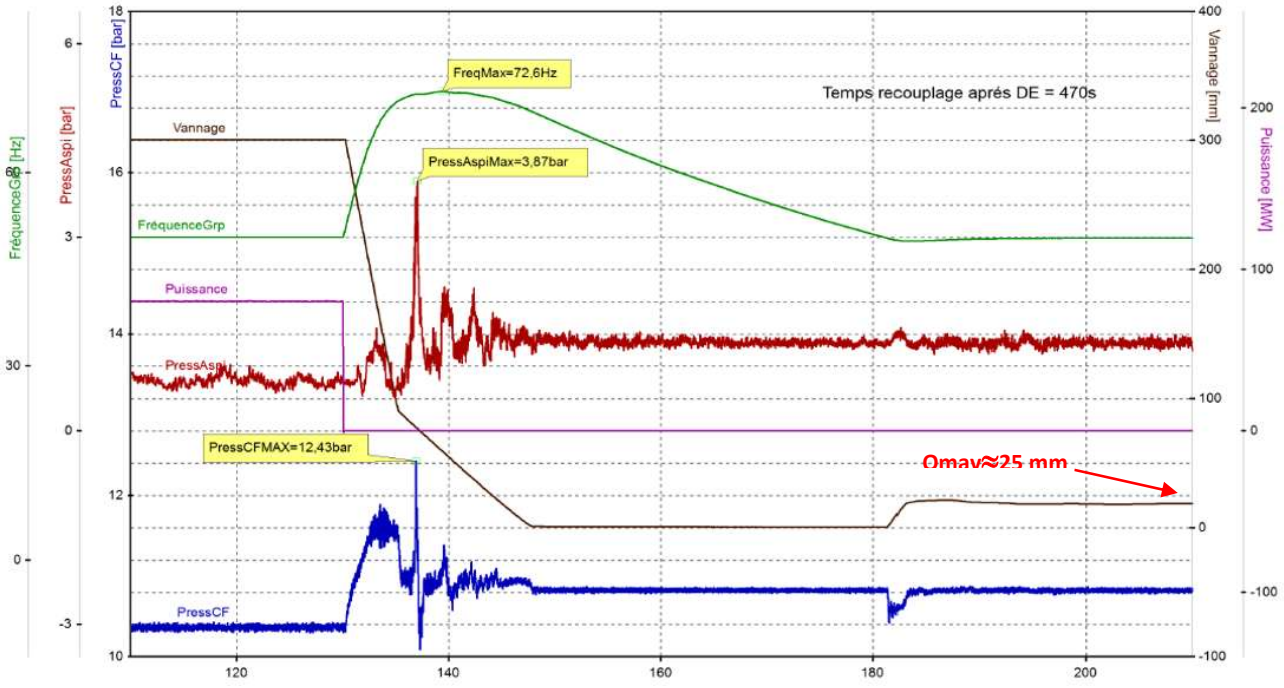
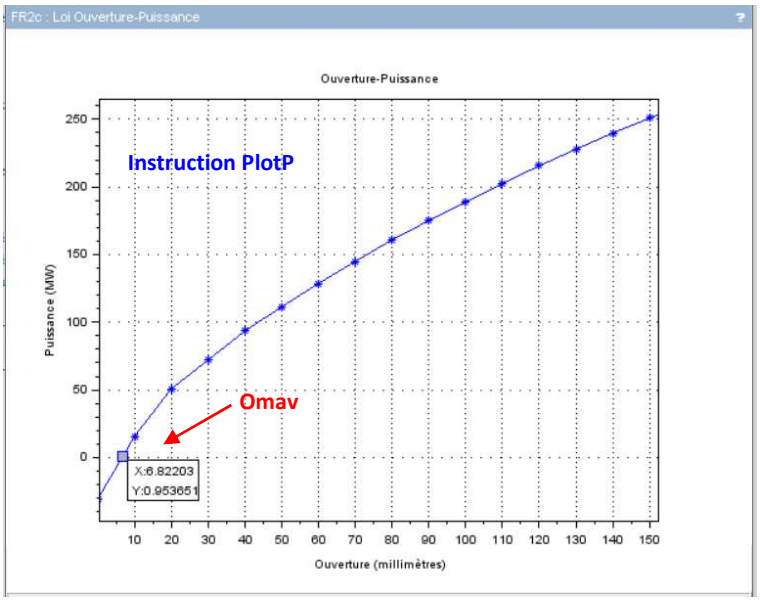


Figure 29 : Évaluation de l'ouverture de marche à vide Omav lors d'un déclenchement DE

2. Si bLOQ=0, le paramètre Omav n'est pas pris en compte, mais évalué à partir de la loi de linéarisation Puissance/Ouverture. Dans ce cas, Omav est l'ouverture du servomoteur à puissance nulle.




```
if bLOQ==0 then
                                    // Linéarisation du système par la loi analytique Q=O^nq (nq=0.7)
                                    //-------------------------------------------------------------
                                    LinePQH_1()
                                                  Interpolation sur la loi Puissance/Ouverture au point P=0
                                    // Redéfinition de la marche à vide Omav
                                    //--------------------------------------
                                    Omav=interpln([P;O],0)
```

Figure 30 : Évaluation du paramètre de marche à vide Omav par interpolation linéaire sur la loi Puissance/Ouverture (bLOQ=0)

3.5 Paramètres du régulateur de vitesse

Kp	Gain du correcteur Vitesse (su)	REGN HydroStab
Ti	Constante de temps de l'intégrateur Vitesse (s)	REGN HydroStab

- Kp représente le gain transitoire du régulateur de vitesse Proportionnel/Intégral.

Le statisme temporaire B_t , terme parfois présent dans la littérature, s'exprime par l'inverse du gain K_p :

$$B_t = \frac{1}{K_p}$$

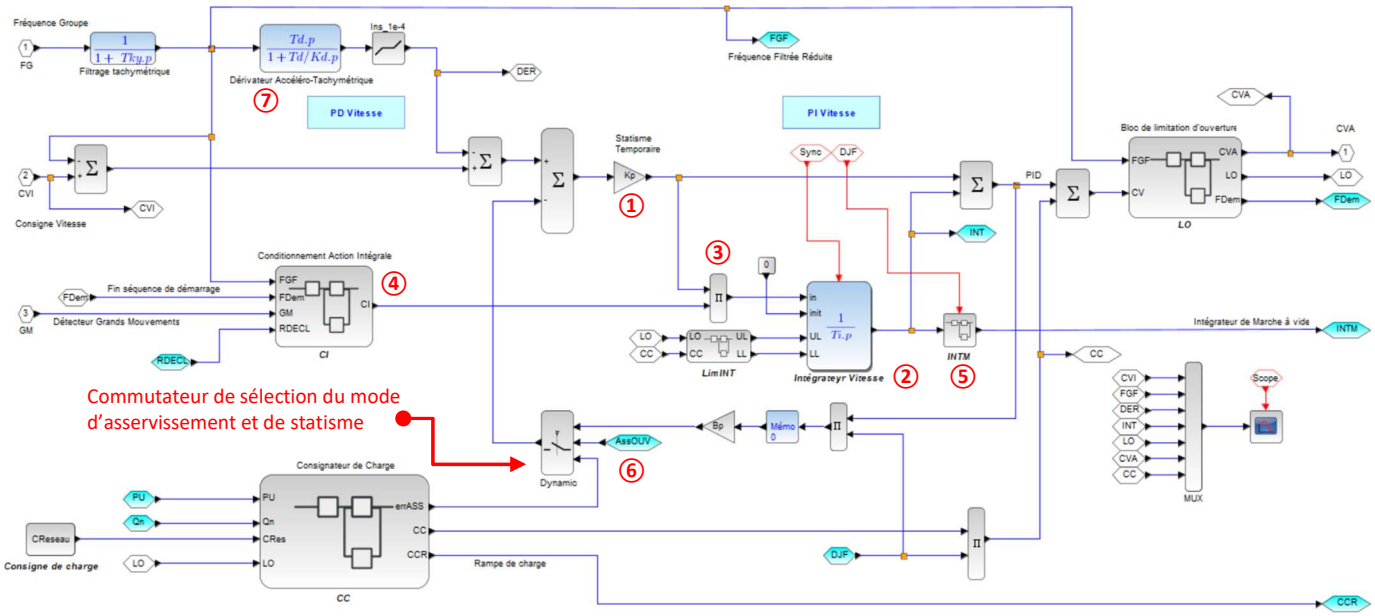


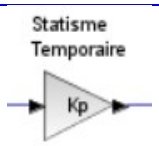
Figure 31 : Régulateur de vitesse pour machine Francis – Circuit Francis FR2➔REGFRA

☞ Valeur à programmer en fonction de l'étude de stabilité conduite sous **HydroStab**

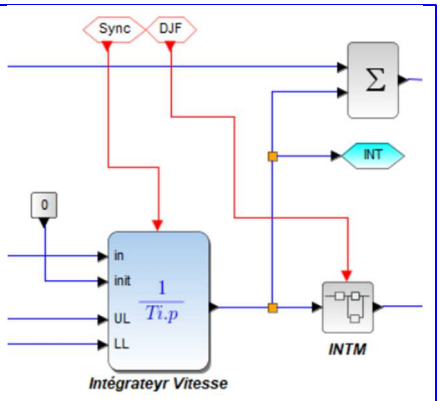
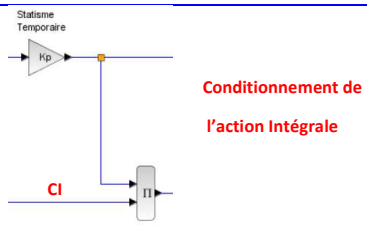
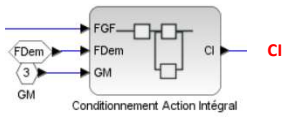
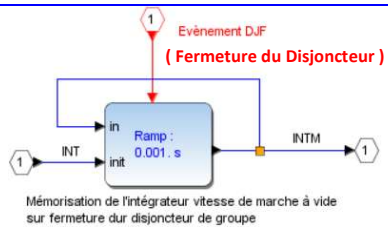
- Ti ajuste l'action intégrale du PI vitesse.

Le composant d'intégration $\frac{1}{T_i * p}$ est réalisé à partir de la bibliothèque complémentaire **SEGPAL**[3], car l'action d'intégration nécessite un mécanisme spécialement étudié pour éviter les saturations du composant dans une commande optimale.

Cet anti-saturateur est connu sous le nom de **système Anti-Win up**, et fait l'objet d'études complémentaires et de nombreuses publications.

①	• Gain Kp du régulateur PI	

[3] La bibliothèque SEGPAL est une palette de composants XCOS conçue spécialement pour le projet **HYDROTUR**, lorsque les composants de base de la palette XCOS ne répondent pas à des besoins spécifiques. Ces composants sont en couleur bleue dans les schémathèques des circuits de simulation.

②	• L'intégrateur reçoit le signal à intégrer sur son entrée « in » • Les composants en rouge fournissent une équation logique, qui, sur détection de front montant, provoquent la réinitialisation instantanée du registre Intégrateur, sur la valeur précisée sur l'entrée « init ». (*Voir Figure 85, Figure 86*) Ici, l'intégrateur est remis à 0 à l'instant de fermeture du disjoncteur de groupe, et sur déclenchement du groupe pour un retour en marche à vide. • Deux entrées « UL » (Upper Limiter) et « LL » (Lower Limiter) permettent le contrôle dynamique de la saturation de l'intégrateur	
③	• L'entrée de l'intégrateur résulte du résultat d'un multiplieur dont le premier terme est l'entrée régulière du correcteur PI, la deuxième entrée est une valeur booléenne **CI** valant 0 ou 1 • Si le booléen est nul, l'intégrateur est donc figé à sa dernière valeur	
④	• L'action intégrale est finalement conditionnée par un jeu de conditions dont le descriptif est indiqué en *Figure 121* (dispositif **Anti-Win up**).	
⑤	• Le bloc « INTM » est prévu pour mémoriser la valeur du terme intégral à la fermeture du disjoncteur. • L'intégrateur de marche à vide INTM est ensuite utilité dans l'initialisation du consignateur de charge, à la fermeture du disjoncteur, en réalisant une tare de la rampe du consignateur CC • Cette opération permet une continuité sans à-coup de la commande électrique (bloc BMAV)	

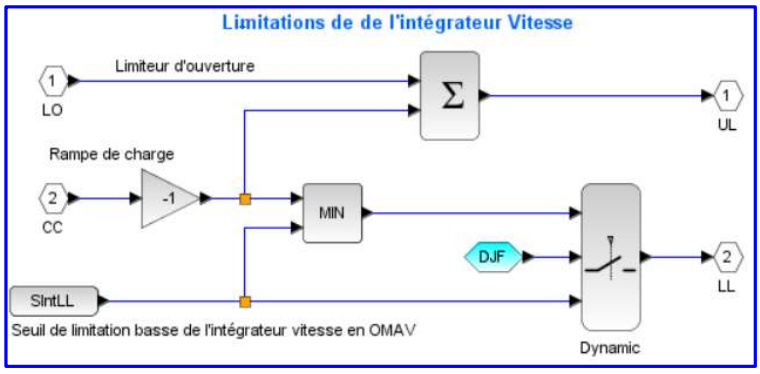
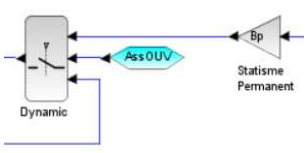


Figure 32 : Bloc LimINT de conditionnement de l'action intégrale

L'intégrateur vitesse est donc borné par :

- Sa limitation supérieure UL=LO-CC
- Sa limitation inférieure LL=Min(-CC,SIntLL)

⑥	• Commutateur de statisme Ouverture / Puissance / Débite à la fermeture du disjoncteur.	

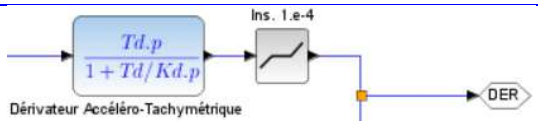
⑦	• Dérivateur accéléro-tachymétrique avec insensibilité vitesse	

Figure 33 : Descripteur du PID Vitesse avec statisme à l'Ouverture / Puissance / Débit

Kd	Gain du dérivateur accéléro-tachymétrique (su)	REGN HydroStab
Td	Constante de temps du dérivateur accéléro-tachymétrique (s)	REGN HydroStab

Les deux paramètres Kd et Td ajustent l'efficacité de l'action dérivée du correcteur vitesse.

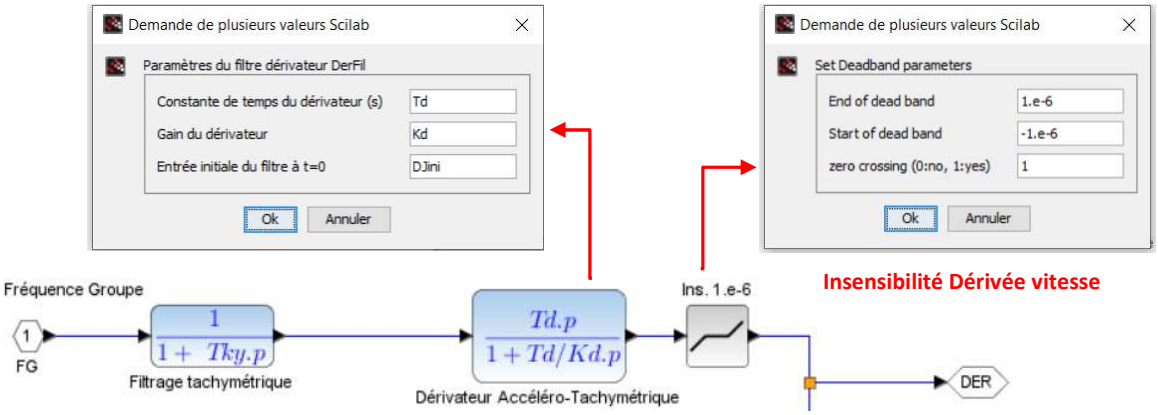


Figure 34 : Dérivateur accéléro-tachymétrique dans les blocs REGN

L'action dérivée est calculée à partir de la mesure de vitesse filtrée, et non pas sur l'écart vitesse du régulateur PID.

La fonction de « dérivateur Accéléro-Tachymétrique » est réalisée à partir d'un composant de la bibliothèque **SEGPAL**, dans le but de **forcer l'action dérivée à 0** en fonction des conditions initiales de lancement de la simulation :

- Si le simulateur démarre en l'état « Machine à l'arrêt » (TDJF>0, FG=0 ⇒ **DJini**=0)
- Si le simulateur démarre en l'état « Groupe couplé au réseau à vitesse nominale » (TDJF=0, FG=1 ⇒ **DJini**=1)

Ce dispositif permet d'éliminer un régime transitoire inutile au démarrage de la simulation.

☞ Kd : Programmer Kd=10.0 sauf indications particulières.

☞ Td : Valeur à programmer selon les résultats de l'étude de stabilité **HydroStab**

L'action dérivée est dotée d'une insensibilité programmée à $\pm 1.e^{-4}$

Bp	Statisme permanent à Fréquence/Ouverture (su)	REGN XLS

L'objet du statisme permanent est de limiter délibérément la participation du groupe au réglage primaire de la fréquence, afin d'équilibrer les contributions des générateurs connectés sur le même réseau électrique.

Le statisme permanent s'exprime par une relation linéaire : $\Delta X = -\frac{\Delta F}{B_p}$

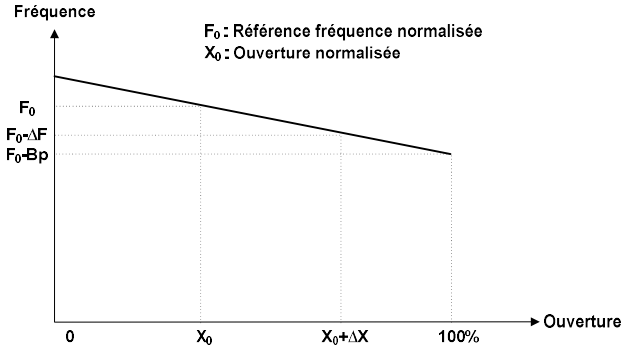


Figure 35 : Statisme permanent Bp à l'ouverture

Bp est donc un paramètre d'exploitation du groupe, ajusté par les exploitants.

Remarque

☞ Le statisme permanent n'est actif que lorsque le groupe est couplé au réseau. Il n'est donc pas opérationnel lors de la phase de mise au synchronisme du groupe

D'autre part, une étude de stabilité d'un groupe hydro-électrique est réalisée dans les conditions les plus défavorables, soit lorsque le groupe est astatique.

Programmer Bp=0.04 sauf indications ou essais particuliers.

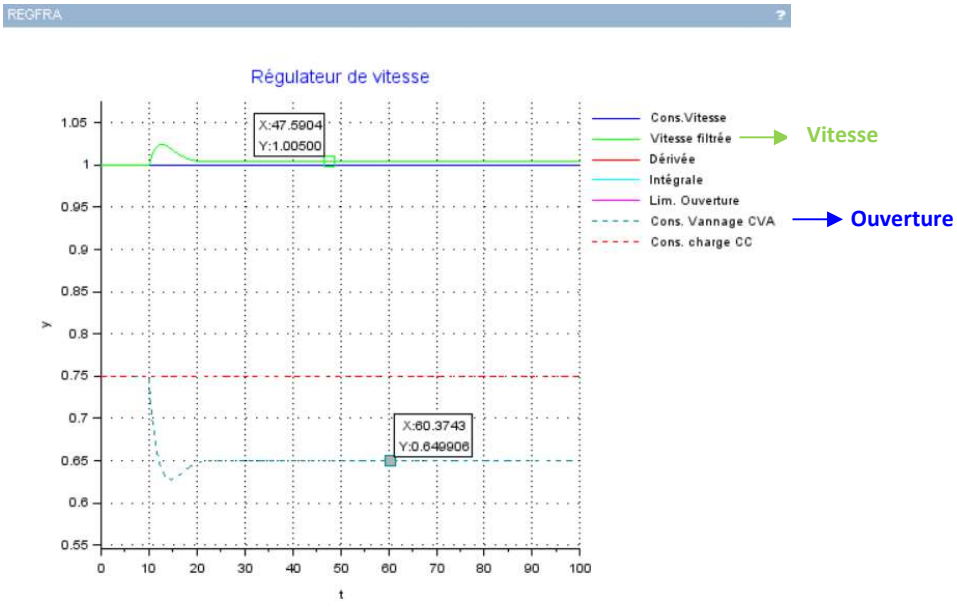


Figure 36 : Vérification du statisme à l'ouverture (Circuit FR2)

Mode d'asservissement ModAss=0 – Disjoncteur Fermé – Perturbation de charge 10% à t=10s - Statisme programmé Bp=0.05

$$Bp = \frac{\Delta f}{\Delta Van} = \frac{5.10^{-3}}{10^{-1}} = 0.05$$

Bp2	Statisme permanent Fréquence/ Débit ou Puissance (su)	REGN – CC XLS

Le statisme permanent s'exprime par une relation linéaire : $$\Delta P = -\frac{\Delta F}{B_p}$$

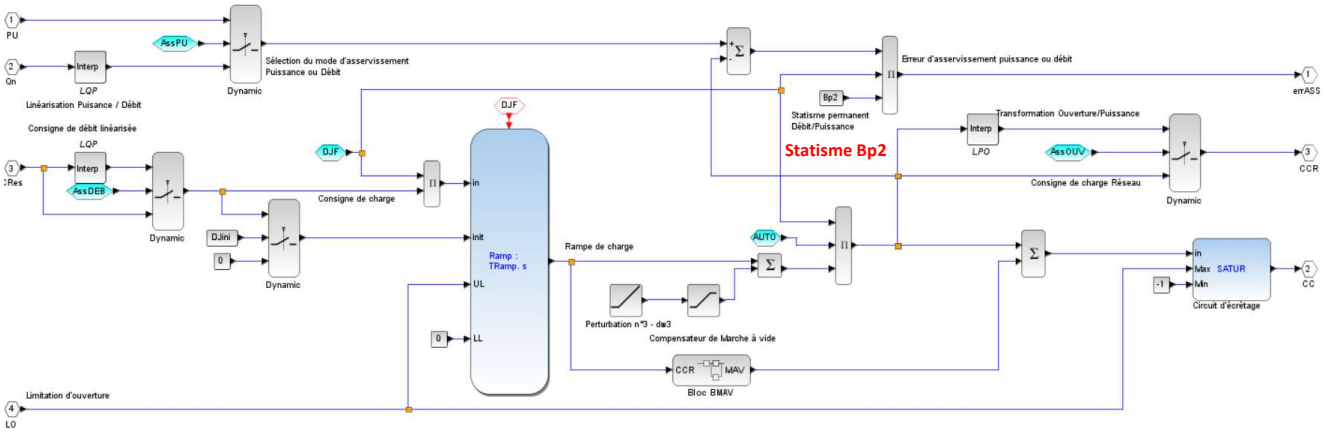


Figure 37 : Statisme Bp2 dans le module CC de consignation de charge

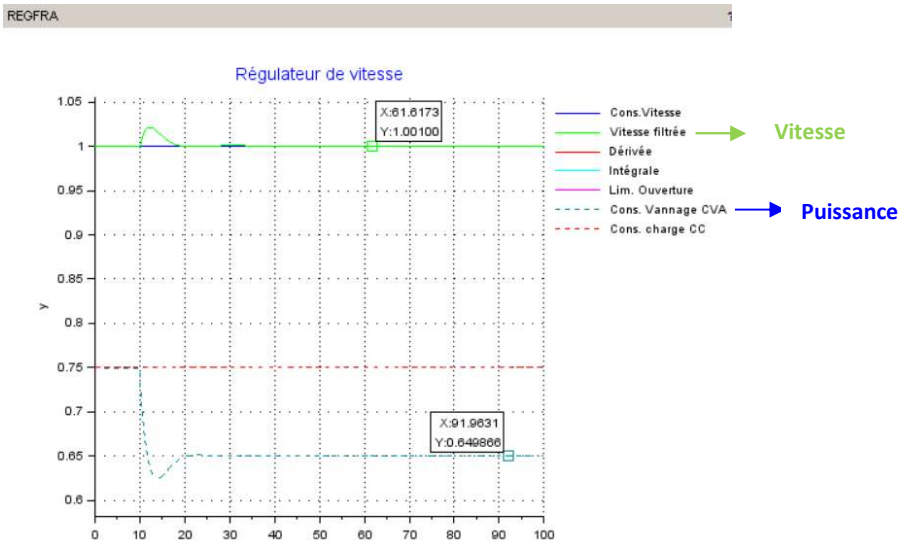


Figure 38 : Vérification du statisme à la puissance (circuit FR2)

Mode d'asservissement ModAss=1 – Disjoncteur Fermé – Perturbation de charge 10% à t=10s - Statisme programmé Bp2=0.01

$$Bp = \frac{\Delta f}{\Delta P} = \frac{10^{-3}}{10^{-1}} = 0.01$$

Tky	Constante de temps du filtre tachymétrique (s)	REGN - XLS

Tky représente la constante de temps d'un filtre passe-bas d'ordre 1 positionné sur le retour de la chaîne vitesse (Tachymétrie), élaborée dans le bloc **RESEAU**.

Ce paramètre est conservé dans l'étude dans la mesure où il apporte un retard de phase dans la boucle de traitement, et est toujours présent dans les régulateurs numériques temps réel.

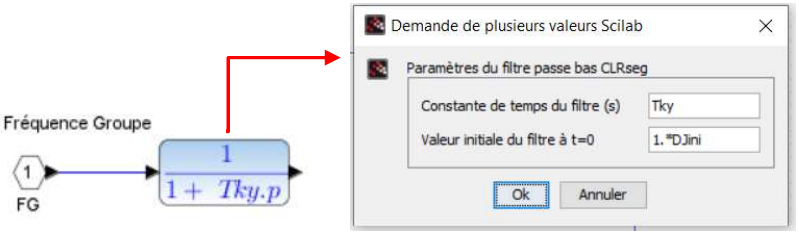


Figure 39 : Filtrage passe-bas tachymétrique

Ce filtre passe-bas d'ordre 1 est réalisé par un composant de la bibliothèque **SEGPAL**, dans le but de maitriser la valeur du filtre au démarrage de la simulation, et éviter tout régime transitoire :

- Si le simulateur démarre en l'état « Machine à l'arrêt » (TDJF>0, FG=0 ⇒ **DJini**=0) le filtre est initialisé à 0, soit à la vitesse nulle.
- Si le simulateur démarre en l'état « Groupe couplé au réseau à vitesse nominale » (TDJF=0, FG=1 ⇒ **DJini**=1), le filtre est initialisé à 1.0, soit à la vitesse nominale.

SIntLL	Seuil de limitation minimale de l'intégrateur vitesse en marche à vide (pu)	REGN – LimINT XLS

Ce paramètre conditionne la limitation minimale LL de l'intégrateur vitesse.

☞ *Voir Figure 32 : Bloc LimINT de conditionnement de l'action intégrale*

Programmer par défaut SIntLL=-0.05

3.6 Réglage des modes de fonctionnement

TStart	Instant de démarrage de la turbine (s)	Système - XLS

Suite au lancement de la simulation, TStart introduit un temps retard de l'ordre de marche Turbine, afin de s'assurer des conditions de stabilité du démarrage du groupe à l'arrêt.

TStart n'est significatif que **si TDJF>0**, soit un démarrage du groupe Disjoncteur Ouvert (DJO)

Lorsque l'on lance une simulation groupe couplé au réseau (TDJF=0), ce paramètre n'est donc pas pris en compte.

☞ Programmer TStart=2.0 sauf indication contraire

TDJF	Instant de fermeture du disjoncteur (s)		SetPoint
TDJF	**= 0**	Démarrage du simulateur groupe couplé au réseau	
	> 0	Instant de fermeture du disjoncteur de groupe (s)	

TDJF définit l'instant de couplage de la turbine sur le réseau électrique.

Si TDJF=0, le transitoire de démarrage de la turbine n'est pas exécuté, et la simulation démarre Groupe couplé au réseau, en évitant tout régime transitoire.

Dans ce cas, le temps TStart est également ignoré.

☞ En mode Manuel, le paramètre TDJF n'est pas pris en compte, afin d'assurer la cohérence du circuit, dans ce cas.

TDECL	Instant de déclenchement du groupe hydroélectrique (s)	SetPoint

TDECL définit l'instant de déclenchement du groupe au réseau électrique, soit l'instant où le groupe ne produit plus d'énergie sur le réseau.

☞ Pour ne jamais déclencher le groupe, programmer TDECL>=TSim. Sinon, indiquer en seconde la valeur souhaité TDECL<<TSim.

MoDECL	Mode de déclenchement du groupe hydroélectrique (su)		XLS
MoDECL	**0**	Déclenchement du groupe avec arrêt machine	
	1	Déclenchement du groupe avec retour en marche à vide	

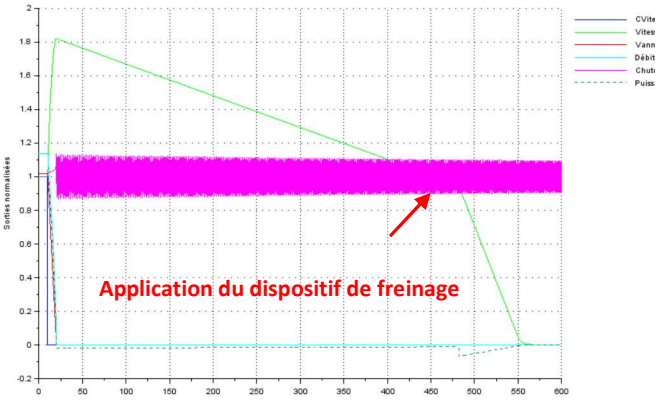


Figure 40 : Déclenchement du groupe avec arrêt groupe et freinage (MoDECL=0)

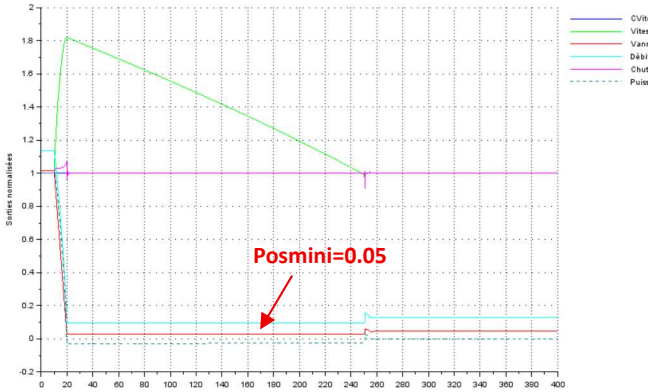


Figure 41 : Déclenchement du groupe avec retour en marche à vide (MoDECL=1) et action du relais de déclenchement RDECL

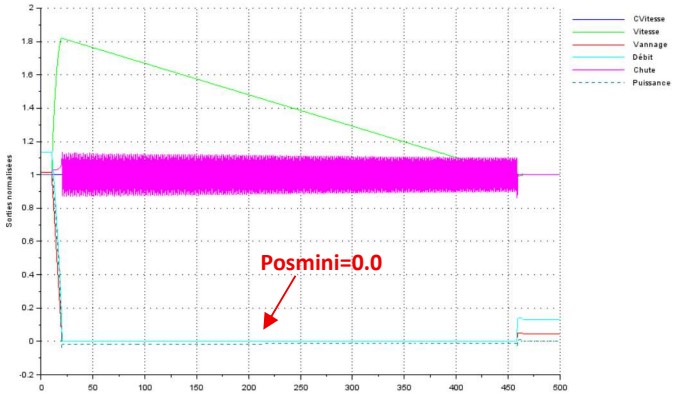


Figure 42 : Déclenchement du groupe avec retour en marche à vide (MoDECL=1) sans relais de déclenchement RDECL

Modem	Mode de démarrage de la turbine (su)		XLS
Modem	**0**	Démarrage turbine en mode Bang	
	1	Démarrage turbine suivant une rampe de vitesse	

- Le démarrage type Bang consiste à démarrer le groupe turbo-alternateur de façon à obtenir une mise au synchronisme du groupe en temps minimal, avec une accélération maximale.de la machine (*Figure 43, Figure 56, Figure 57*)

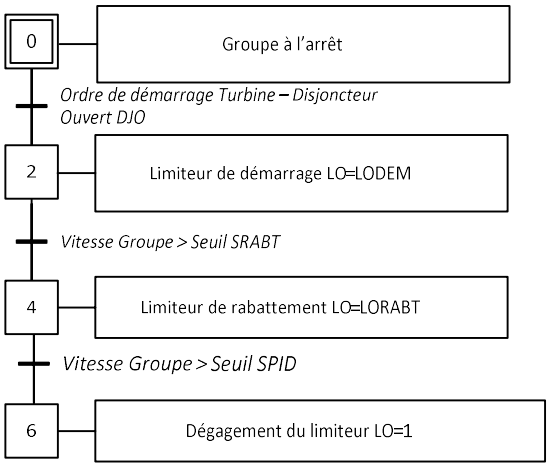


Figure 43 : Séquenceur de démarrage Bang

Dès réception de l'ordre de marche turbine, le limiteur de vitesse LODEM est appliqué.

Cette opération provoque l'initialisation instantanée de la consigne de vannage à cette même valeur, et impose au groupe une accélération maximale.

Le groupe monte alors en vitesse.

Lorsque la vitesse du groupe atteint le seuil SRABT, le limiteur LORABT est appliqué pour casser l'accélération du groupe et ainsi le décélérer pour obtenir un accostage optimal.

Lorsque la vitesse atteint le seuil de régulation de vitesse SPID, le limiteur d'ouverture est définitivement dégagé, et le groupe est prêt pour la séquence de mise au synchronisme.

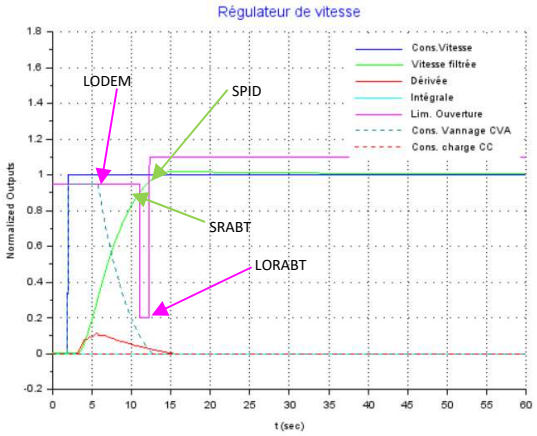


Figure 44 : Démarrage type Bang

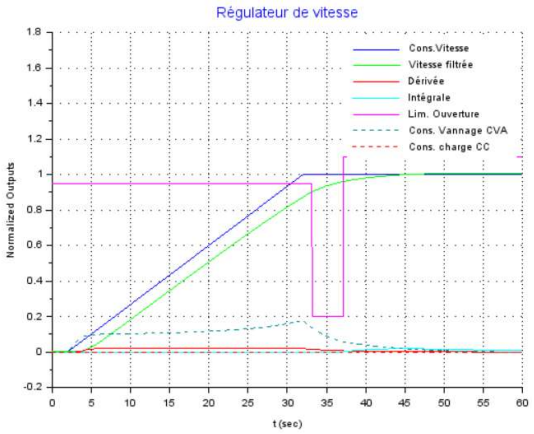


Figure 45 : Démarrage sur une rampe de vitesse

- Le démarrage peut aussi être réalisé de façon moins brutale en appliquant une consigne de vitesse suivant une rampe, variant de 0 à 100% lors de la réception de l'ordre de marche machine. (*Figure 44*).

☞ **Le choix entre l'une ou l'autre des séquences dépend de l'inertie du groupe Turbine+Alternateur, mais surtout de l'amplitude des fluctuations non admissibles qui pourraient apparaitre dans les circuits d'adduction ou des mécanismes vibratoires enregistrés sur la machine.**

Il convient donc d'être prudent dans le choix de l'une ou l'autre de ces séquences.

Riso	Fonctionnement en réseau interconnecté ou réseau isolé (su)		SetPoint
Riso		**0**	Fonctionnement en réseau interconnecté
		1	Fonctionnement en réseau isolé

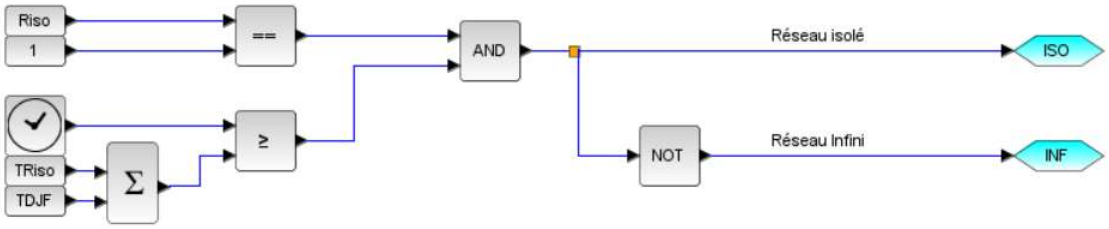


Figure 46 : Implantation de la variable Riso et Séquence de passage en mode réseau isolé (bloc Système)

Les normes CEI [4] et [5] précisent les différents modes d'interaction du régulateur avec le réseau sur lequel est couplé le groupe turbo-alternateur :

- En fonctionnement sur réseau isolé avec un seul groupe (réseau de petite taille), la vitesse effective et, par conséquent, la fréquence, correspondent à la valeur du signal de consigne

- En fonctionnement sur réseau isolé avec plus d'un groupe (réseau de taille moyenne), la régulation de vitesse contribue au réglage de fréquence via le statisme permanent programmable, de façon à éviter les oscillations entre groupes.

- En fonctionnement sur réseau interconnecté, la vitesse étant déterminée par la fréquence du réseau, la régulation de vitesse contribue au réglage de la fréquence du réseau via le statisme permanent programmable, grâce aux caractéristiques dynamiques du système commandé.

D'autre part, l'équation fondamentale de la dynamique permet la modélisation simplifiée de la vitesse de la machine :

$$C_m - C_r = J\frac{d\Omega}{dt}$$

où C_m représente le couple moteur (turbine), C_r le couple résistant (réseau), J l'inertie du groupe turbo-alternateur, et Ω la vitesse de rotation de la machine.

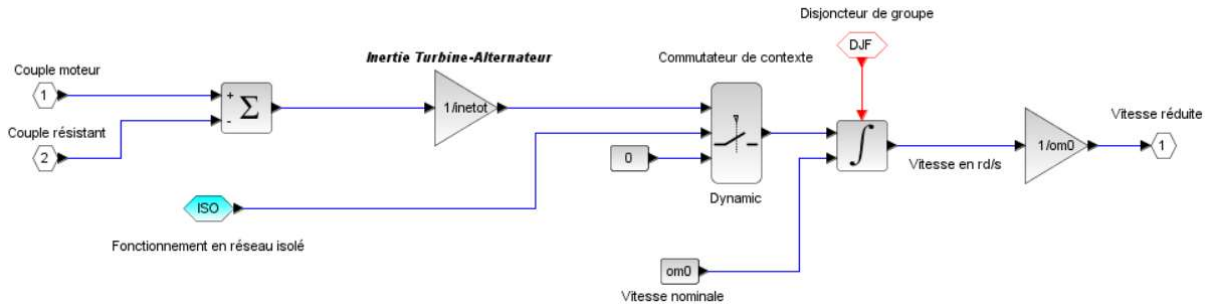


Figure 47 : Schéma simplifié de la vitesse du groupe turbo-alternateur (block Reseau)

La variable d'état **ISO**, dans le schéma général précédent (*Figure 47*), est, en réalité, implanté de façon légèrement différente, afin de garantir toutes les fonctionnalités de **HydroSim ;** en particulier lors des relevés de linéarité et des linéarisations des boucles Puissance/Ouverture ou Débit/Ouverture[4], en mode MANUEL :

[4] Voir *Chapitre 4 : Lois de linéarisation*

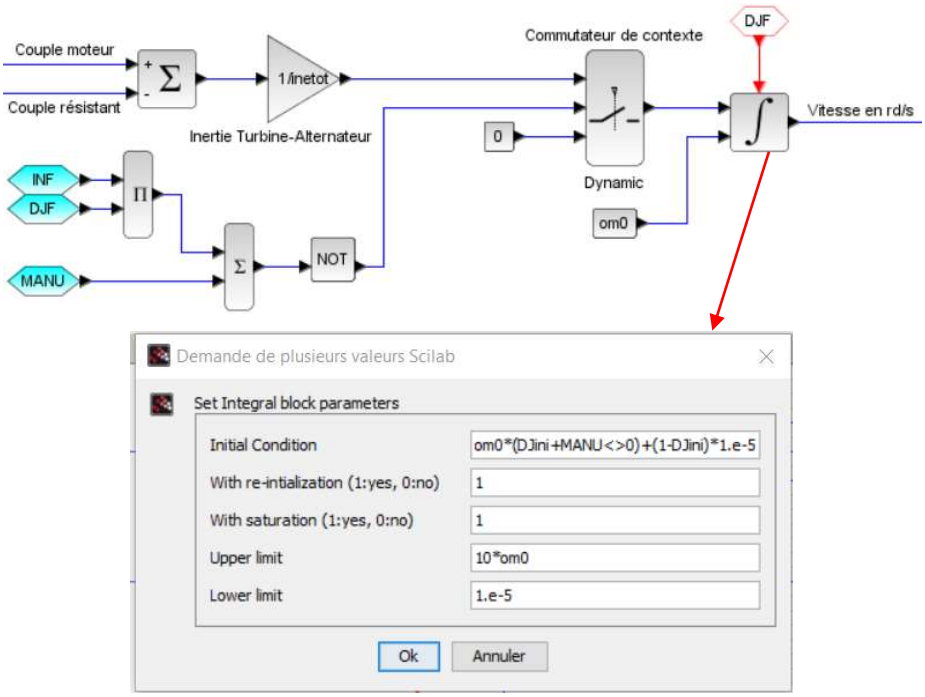


Figure 48 : Implantation du mode réseau isolé dans le bloc **Reseau**

L'intégrateur est initialisé, au lancement de la simulation, prenant en compte la position initiale du disjoncteur TDJF programmée (⇒ calcul de DJini) ou la prise en charge du mode MANUEL, et suivant l'équation de vitesse à t=0 :

om0*(**DJini**+**MANU**<>0)+(1-**DJini**)*1.e-5 (rd/s)

La simulation démarre donc soit à vitesse nulle, soit au nominal.

Dans le cas d'un démarrage à l'arrêt, la fermeture du disjoncteur de groupe DJF provoque instantanément la réinitialisation de l'intégrateur vitesse à la vitesse nominale (Champ « With re-initialization »=1)

TRiso	Temps pour passer en mode réseau isolé (s)	XLS

Dans certaines simulations, il est parfois préférable (rare) de temporiser la fermeture du disjoncteur pour éviter un transitoire au moment du couplage (voir *Figure 46*)

☞ Sauf indication contraire, programmer TRiso=0.0 s

ModAss	Mode d'asservissement Régulateur en charge (su)		CC - SetPoint
ModAss		**0**	Asservissement à l'ouverture
		1	Asservissement à la puissance
		2	Asservissement de débit

La machine étant couplée au réseau électrique, ModASS définit le mode d'exploitation du groupe turbo-alternateur.

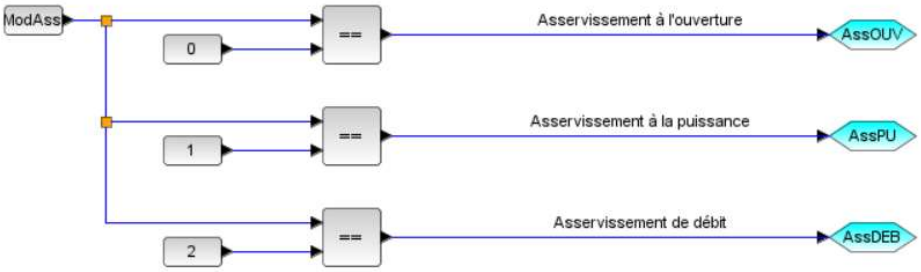


Figure 49 : Mode d'exploitation du groupe en charge (module CC)

- En asservissement à l'ouverture, le PID vitesse est rebouclé par son statisme permanent à l'ouverture Bp (*voir Figure 31*)
- En asservissement à la puissance ou au débit, le PID est rebouclé par son statisme permanent à la puissance ou au débit Bp2.

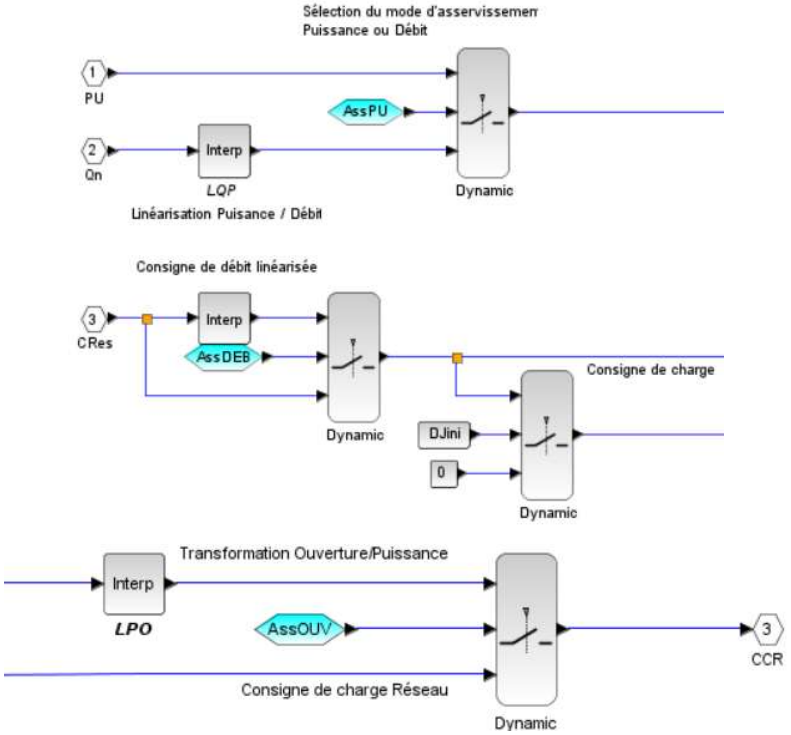


Figure 50 : Commutateurs d'asservissement à la Puissance, à l'Ouverture, ou au Débit dans le bloc CC

☞ Programmer ModAss=1

3.7 Régulateur de Vitesse et Consignation

3.7.1 Principe de consignation

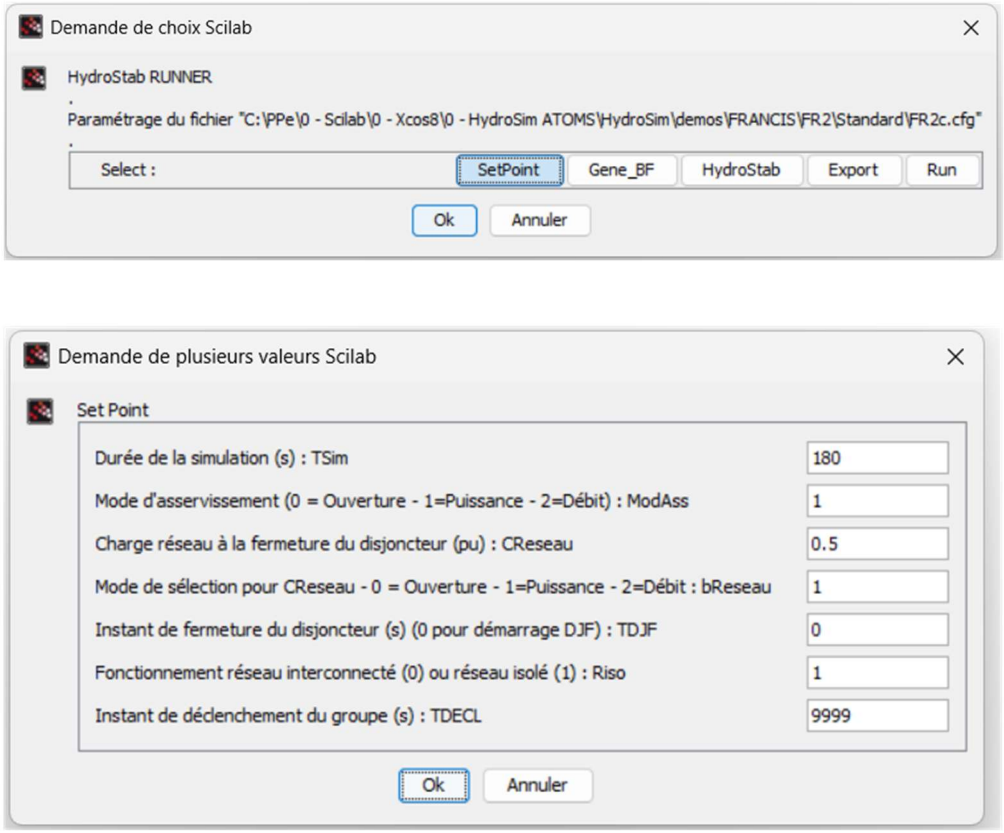


Figure 51 : SetPoint : Accès aux principaux paramètres de consignation du groupe hydraulique

L'accès aux principaux paramètres de consignation du groupe hydraulique et d'une simulation est réalisé en exécutant un ***fichier SCE*** dans le répertoire de démonstration « ***HydroSim\demos*** ».

L'exécution du fichier SCE fait apparaitre la fenêtre ***HydroSim RUNNNER,*** puis choisir ***SetPoint*** dans la liste des menus proposés. Valider par la touche OK.

Les paramètres du menu SetPoint décrivent le comportement du groupe au lancement de la simulation :

- Séquence de démarrage du groupe ou groupe déjà couplé au réseau
- Charge du groupe à prendre en considération
- Fonctionnement en réseau isolé ou groupes interconnectés.
- Instant de déclenchement du groupe avec Arrêt groupe ou Retour en marche à vide
- …etc

Les paramètres [Tsim, ModAss, Creseau, bReseau, TDJF, Riso, TDECL] sont décrits dans ce document et directement accessibles en utilisant l'index de ce document.

3.7.2 Paramètres généraux

CV_Nom	Consigne de vitesse nominale du consignateur de vitesse (pu)	CVIT - XLS

CV_Nom désigne la consigne de référence en valeur normée du régulateur de vitesse.

☞ Programmer CV_Nom=1.0.

Cependant, en marche à vide, la référence vitesse peut être modifiée pour tester des fonctionnements sur des points intermédiaires en régulation de vitesse (*voir bloc CVIT*)

TRampF	Temps de rampe du consignateur de vitesse (s)	CVIT - XLS

TRampF définit le temps mis par le consignateur de vitesse pour passer la consigne de vitesse de 0% à 100%

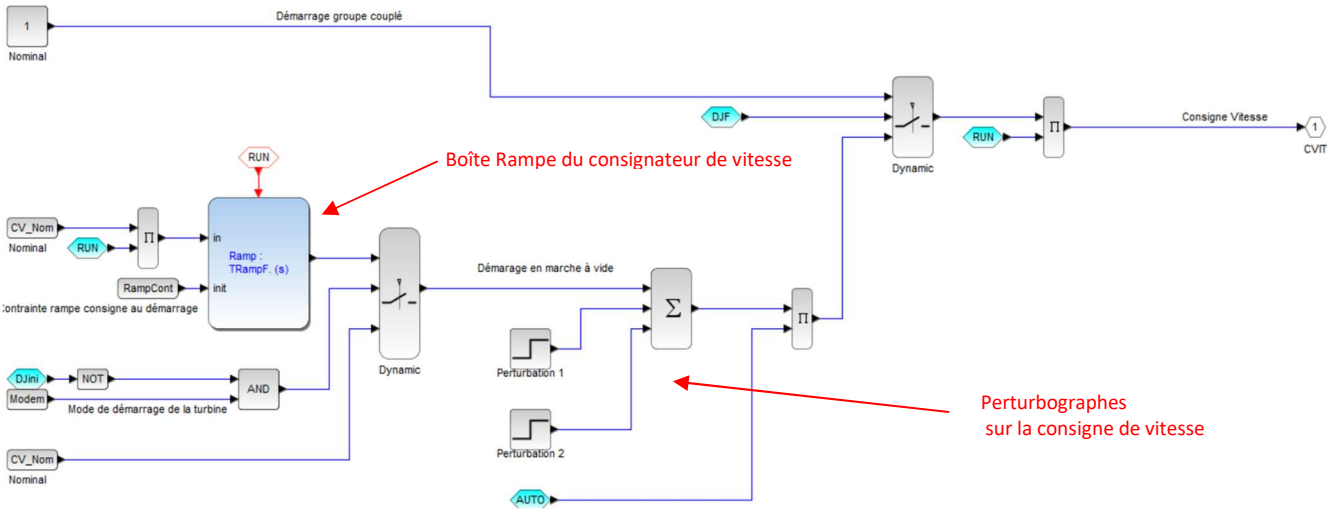
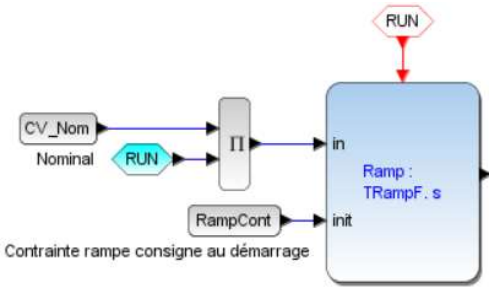


Figure 52 : Boîte Rampe du consignateur de vitesse (bloc CVIT)

RampCont	Contrainte de la rampe vitesse au démarrage (pu) (Si Modem=1)	CVIT - XLS

RampCont définit une contrainte d'initialisation de la rampe vitesse, dans le module Consignateur de Vitesse, afin de minimiser les oscillations conduites dues à la dépression conséquente à l'ouverture d'une vanne (si Modem=1, soit Démarrage du groupe sur une rampe vitesse)



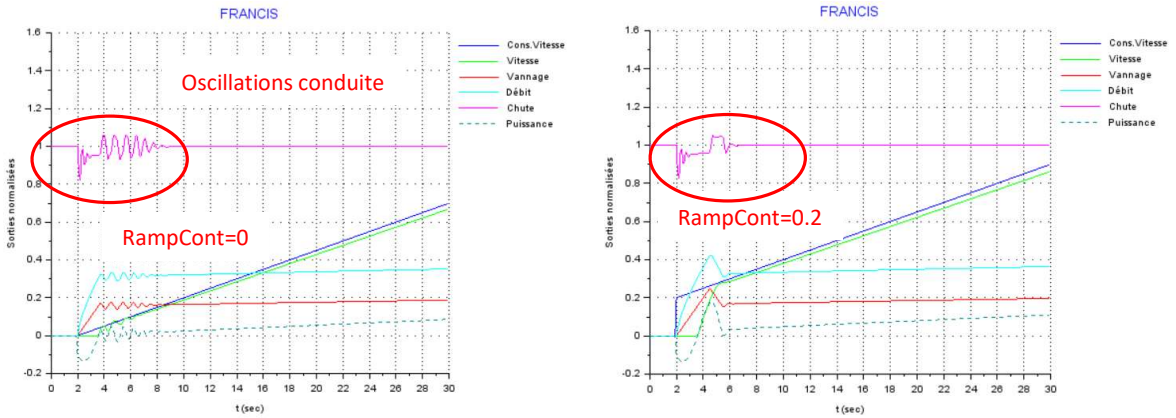


Figure 53 : Précontrainte de la consigne de vitesse au démarrage sur une rampe de vitesse (si Modem=1)

☞ Programmer RamptCont=0.0 par défaut

3.7.3 Pertubographes sur la consigne de vitesse

df1	Amplitude de l'échelon de perturbation n°1 (pu)	CVIT - XLS
tdf1	Instant d'application de l'échelon de perturbation n°1 (s)	CVIT - XLS
df2	Amplitude de l'échelon de perturbation n°2 (pu)	CVIT - XLS
tdf2	Instant d'application de l'échelon de perturbation n°2 (s)	CVIT - XLS

Cet ensemble de paramètres est utilisé dans le pertubographe introduit sur la consigne de vitesse dans le bloc CVIT.

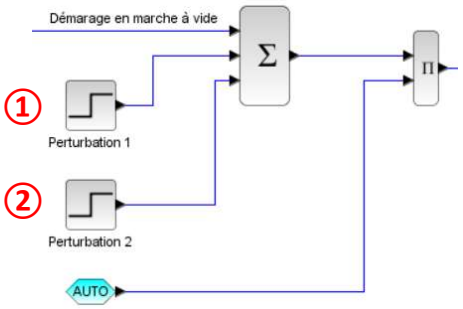


Figure 54 : Perturbations sur la consigne de vitesse – Module CVIT

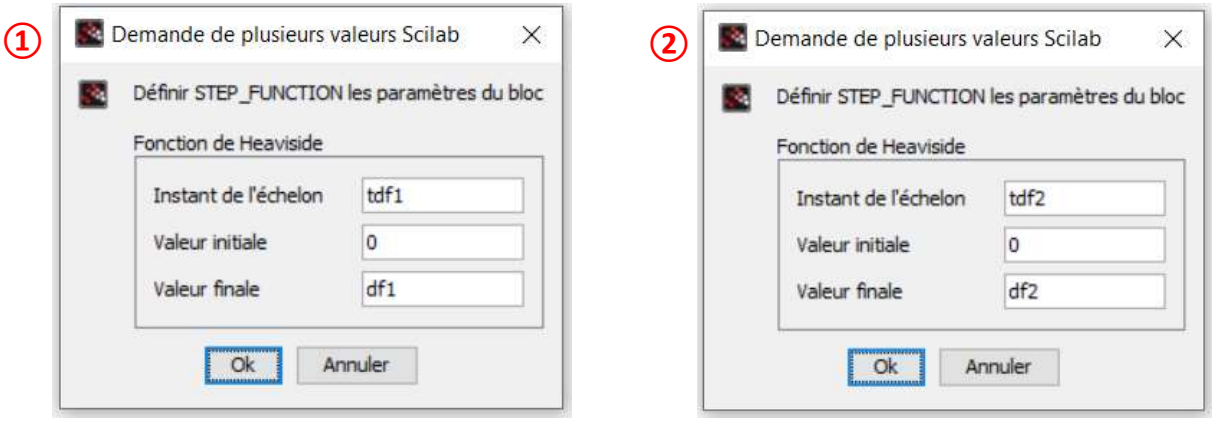


Figure 55 : Réglage des échelons de consigne de vitesse sur le pertubographe – Module CVIT

3.7.4 Paramètres du bloc de Limitation d'ouverture

3.7.4.1 Limiteurs transitoires dans la Séquence BANG

LODEM	Limiteur de démarrage (pu)	LO - XLS
LORABT	Limiteur de rabattement (pu)	LO - XLS
SRABT	Seuil de commutation du limiteur d'ouverture à LORABT (pu)	LO - XLS
SPID	Seuil de mise en œuvre du PID Vitesse (pu)	LO - XLS

Ce groupe de paramètres est utilisé pour générer une séquence de démarrage de type Bang, et sont inclus dans l'interpolateur « interp » du bloc **LO** des limiteurs d'ouverture.

Cette séquence n'est active que si Modem=0 (*voir Figure 43, Figure 44*)

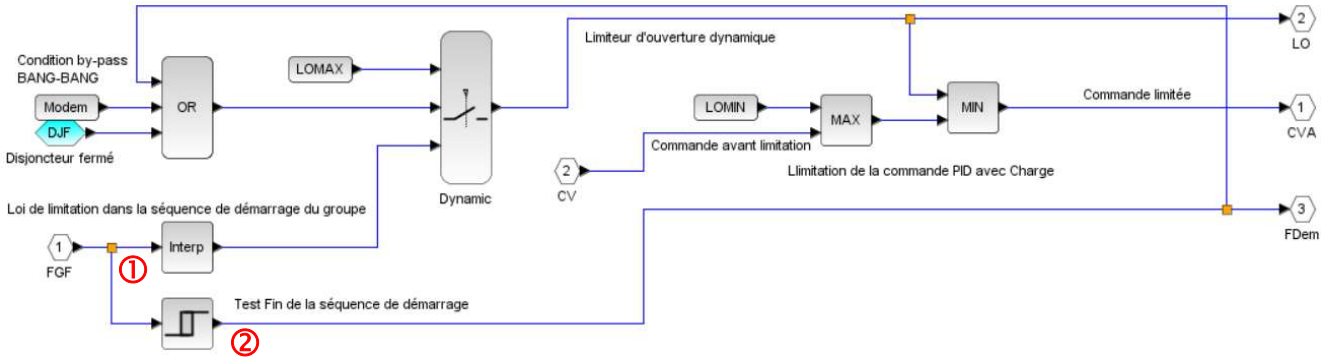


Figure 56 : Instanciation d'une séquence de démarrage de type Bang, dans le module des Limiteurs d'ouverture (Bloc LO)

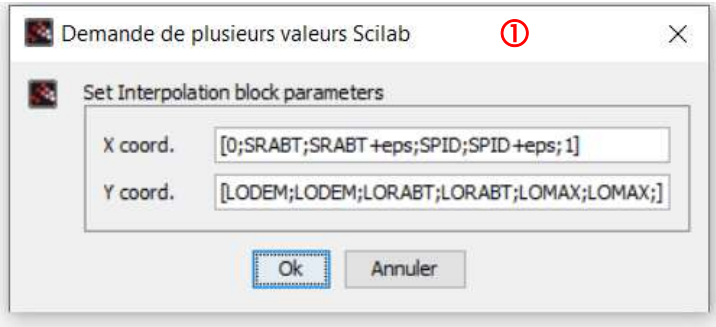


Figure 57 : Séquenceur de l'interpolateur Bang au démarrage (Modem=0)

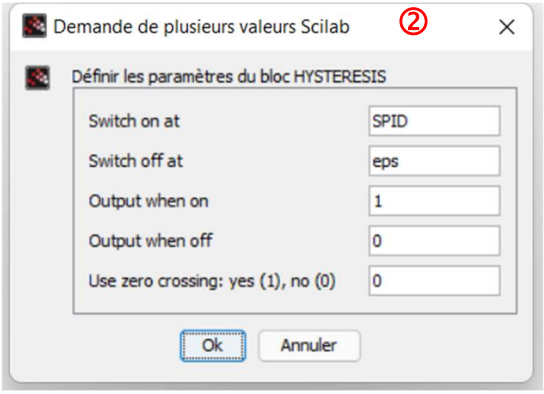


Figure 58 : Détecteur "Fin Séquence de démarrage"

3.7.4.2 Limiteurs permanents

LOMAX	Limitation maximale de la commande du PID vitesse (pu)	LO - XLS
LOMIN	Limitation minimale de la commande du PID vitesse (pu)	LO - XLS

Les deux paramètres bornent la commande issue du PID Vitesse (*voir Figure 56*)

☞ Programmer LOMAX=1.1, LOMIN=-0.0 , sauf indications contraires.

3.8 Consignation en charge et modes de fonctionnement

3.8.1 Paramètres Réseau

CReseau	Consigne de charge à la fermeture du disjoncteur (pu)	REGN - SetPoint
bReseau	Mode de sélection pour CReseau - 0 = Ouverture - 1=Puissance - 2=Débit (su)	Set_CReseau.sci - SetPoint

CReseau fixe la charge imposée au groupe lorsque celui-ci est couplé au réseau électrique.
Creseau dépend du mode d'asservissement imposé au groupe.
Ainsi le paramètre spécifie, en fonction du paramètre **bReseau :**

bReseau	Signification CReseau
0	Consigne de charge à l'Ouverture
1	Consigne de charge en Puissance
2	Consigne de charge en Débit

Le module « CC » modifie la consigne CReseau pour imposer une charge de puissance équivalente CCR dans le module « Reseau ».

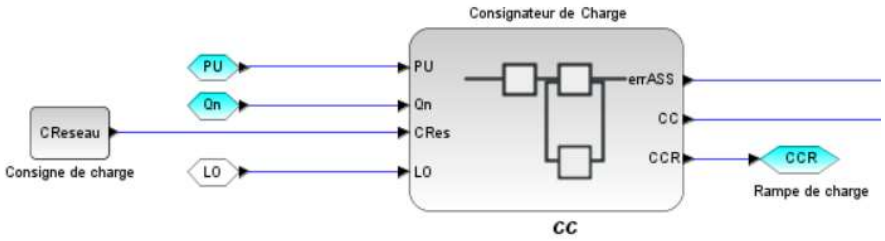


Figure 59 : Prise en compte de la consigne de charge dans le bloc REGN

Voir aussi Figure 50

TRamp	Temps de rampe du consignateur de charge (s)	CC - XLS

TRamp définit le temps mis par le consignateur de charge pour passer la consigne de charge de 0% à 100%.

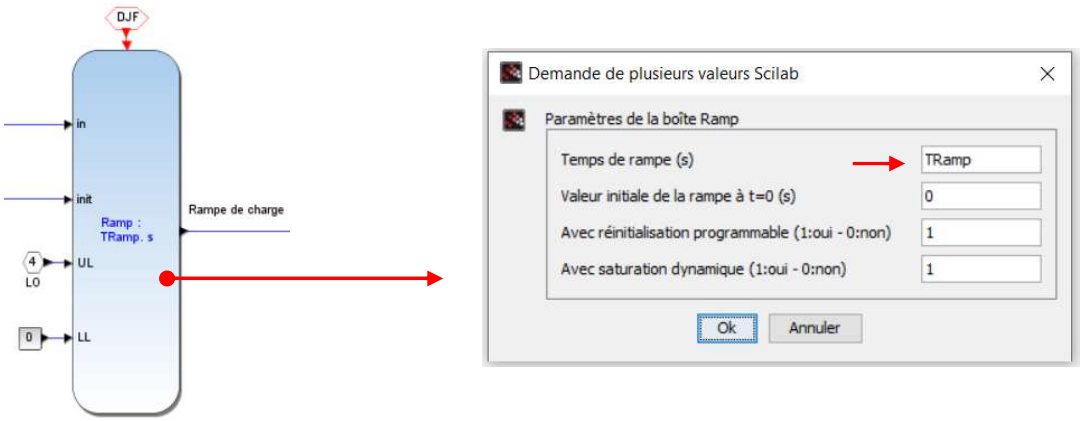


Figure 60 : Boîte Rampe du consignateur de charge dans le module CC

aut	Coefficient d'autoréglage du réseau électrique (pu)	Reseau - XLS

Lorsqu'un réseau comporte une quantité non négligeable de machines tournantes, la puissance demandée croît avec la fréquence, ce qui contribue à la stabilité intrinsèque du réseau. Plus précisément, on appelle coefficient d'autoréglage la grandeur $aut = \frac{\frac{dW}{W_n}}{\frac{df}{f_0}}$, qui caractérise la variation de puissance consommée lorsque la fréquence varie.

En ce sens, ***aut*** représente un statisme réseau, par analogie au statisme permanent programmable caractérisant la relation Fréquence/Ouverture (voir Bp)

Il y a 30 ans, un coefficient d'autoréglage de 1 était représentatif de la plupart des réseaux. Actuellement, avec la généralisation des alimentations à base de convertisseurs, y compris pour les machines asynchrones, la multiplication des chauffages électriques (résistances pures), …, le coefficient d'autoréglage s'approche généralement de 0.

Les clients sont en général incapables de répondre à cette question.

☞ Sauf cas particulier, une étude de stabilité se fait dans le cas le plus défavorable, c'est-à-dire l'autoréglage aut=0.

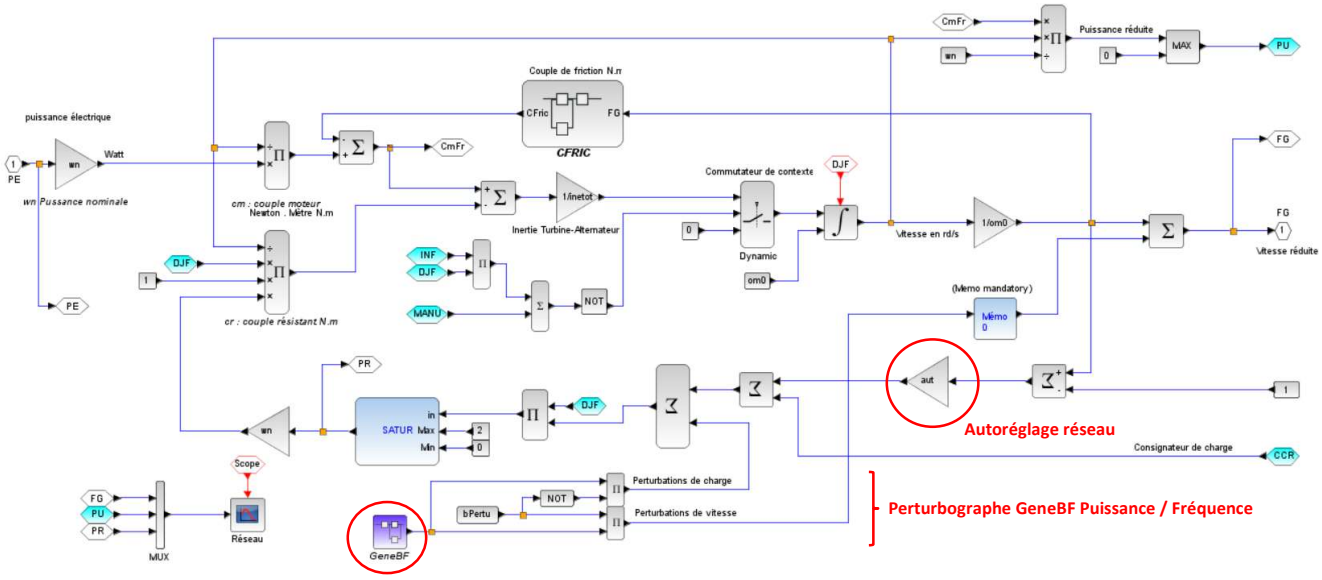


Figure 61 : Principe de modélisation du réseau électrique – Coefficient d'autoréglage du réseau

3.8.2 Générateur de perturbation GeneBF Puissance / Fréquence



Le réglage du générateur **GeneBF** est accessible dans le menu « Gene_BF » de **HydroSim RUNNER,** soit au lancement d'un fichier script SCE[5] :

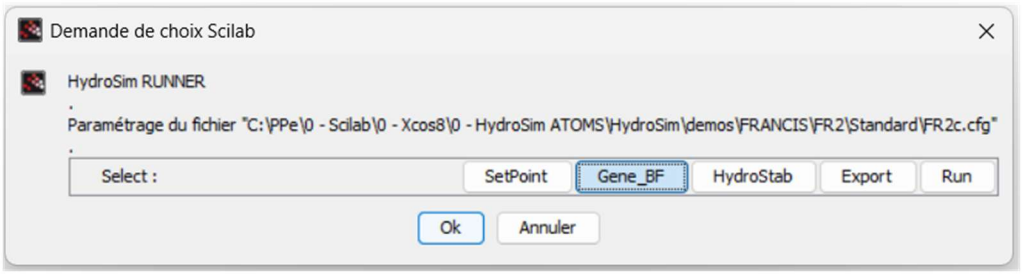


Figure 62 : Réglage du générateur GeneBF dans HydroSim

[5] Fichier FR2c.sce, FR4c.sce, Pell4c.sce, ….etc, par exemple

3.8.2.1 Paramétrage

bPertu	Type de perturbation (0=Charge - 1=Vitesse) (0 ou 1)	Reseau / Gene_BF
modPer	Mode de perturbation (0=Échelons 1=SinuSync (0 ou 1)	Reseau / Gene_BF
dw1	Amplitude de l'échelon de perturbation n°1 (pu)	Reseau / Gene_BF
tdw1	Instant d'application de l'échelon de perturbation n°1 (s)	Reseau / Gene_BF
dw2	Amplitude de l'échelon de perturbation n°2 (pu)	Reseau / Gene_BF
tdw2	Instant d'application de l'échelon de perturbation n°2 (s)	Reseau / Gene_BF
tSinus	Générateur sinusoïdal SinuSync – Instant de départ de la sinusoïde (s)	Reseau / Gene_BF
ASinus	Amplitude du générateur sinusoïdal SinuSync (su)	Reseau / Gene_BF
PSinus	Période du générateur sinusoïdal SinuSync (s)	Reseau / Gene_BF
tDirac	Peigne de Dirac – Instant de départ du peigne (s)	Reseau / Gene_BF
ADirac	Amplitude du peigne de Dirac (su)	Reseau / Gene_BF
PDirac	Période du peigne de Dirac (s)	Reseau / Gene_BF
DDirac	Durée de l'impulsion de Dirac (s)	Reseau / Gene_BF
SDirac	Symétrie de l'impulsion de Dirac (su)	Reseau / Gene_BF

Cet ensemble de paramètres permet de définir un nouveau perturbographe **GeneBF**, utilisé pour émettre des stimuli soit sur le signal de charge, soit directement sur la mesure de vitesse.

Le générateur « GeneBF » s'intègre harmonieusement dans les modules « Reseau » des modèles HYDROTUR (*Voir **Figure 61** ou bloc « **Reseau** » dans les schémathèques*). Un sélecteur piloté par un booléen paramétrable « **bPertu** » oriente le signal de sortie.

L'intérêt du générateur GeneBF est de solliciter *in fine* le régulateur de vitesse pour en mesurer les performances et sa robustesse.

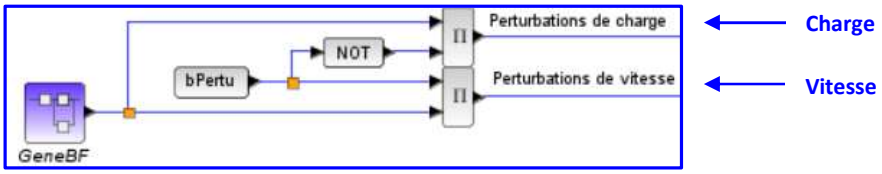


Figure 63 : Principe général du perturbographe Gene_BF dans le module « Réseau »

- Si **bPertu**=0, l'excitation est additionnée à la consigne de charge réseau
- Si **bPertu**=1, l'excitation est additionnée à la mesure de vitesse

HYDROTUR propose l'implantation d'un perturbographe basé sur un générateur de signaux basse fréquence, nommé GeneBF ; celui-ci fournit en sortie :

- Un signal sinusoïdal (**modPer**=1) **ou** des échelons (**modPer**=0)
- L'ajout optionnel d'un peigne de Dirac sur la sortie fournie



Le générateur réalise l'équivalent d'un « Superblock » au sens Xcos du terme, et intègre les composants élémentaires réalisant la fonction ainsi décrite.

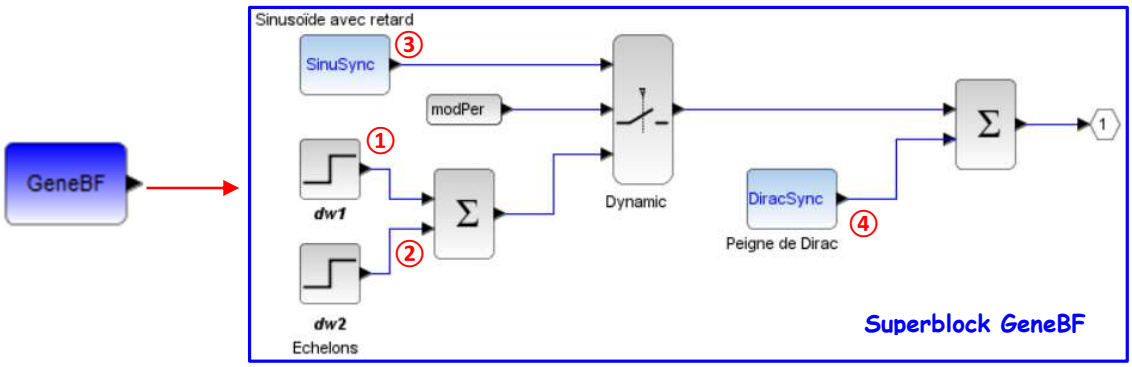


Figure 64 : Composants du générateur GeneBF

Chaque composant dispose de son propre jeu de paramétrage, rendant les fonctions élémentaires indépendantes : Instant de démarrage, Amplitude des signaux, Période, Durée d'un Dirac, …etc.

3.8.2.2 Générateur d'échelons (modPer=0)

Ce générateur est programmable à partir des paramètres dw1, tdw1, dw2, tdw2.

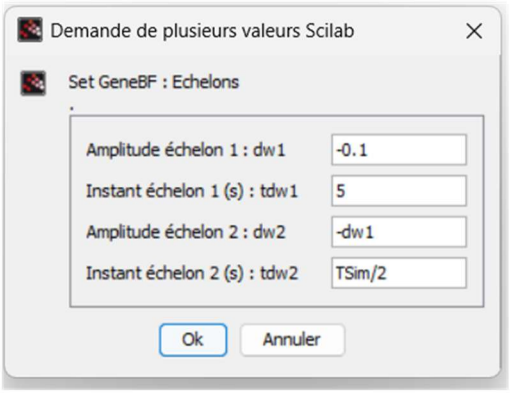


Figure 65 : Réglage des échelons de charge sur les pertubographes n°1 et n°2

En général, on programme dw2=-dw1 pour obtenir une symétrie de la perturbation au temps Tsim/2

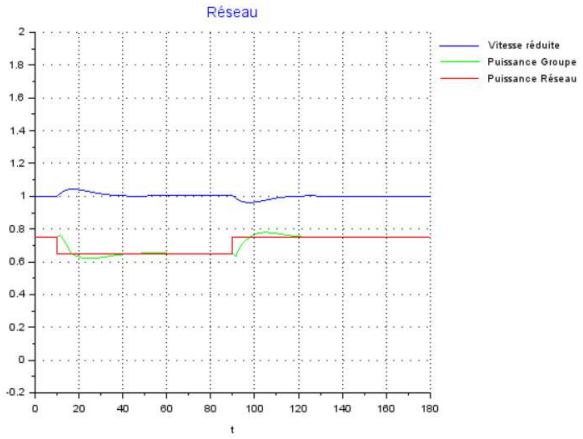


Figure 66 : Exemple d'utilisation du générateur GeneBF en mode « Échelons » sur la consigne de charge

Dans l'exemple ci-dessus, dw1=-0.1 tdw1=10s, dw2=0.1, tdw2=TSim/2 s, bPertu=0.

3.8.2.3 Générateur sinusoïdal (modPer=1)

3.8.2.3.1 Descripteur / Interface

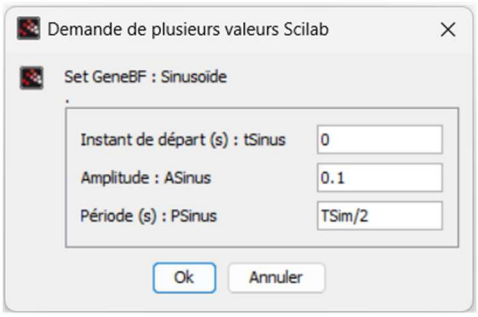


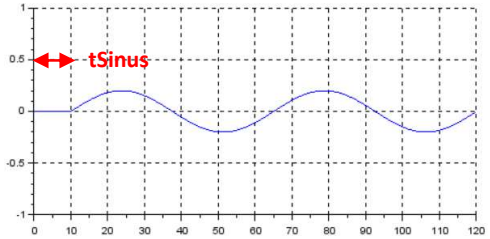
Figure 67 : Paramétrisation du générateur sinusoïdal synchronisé

3.8.2.3.2 Fonction réalisée

$y(t) = 0$ si $t < t_0$

$y(t) = A\sin\frac{2.\pi}{P}(t - t_0)$ *si* $t \geq t_0$

avec A=Asinus , P=PSinus , t_0=tSinus



3.8.2.4 Générateur de peigne de Dirac

3.8.2.4.1 Descripteur / Interface

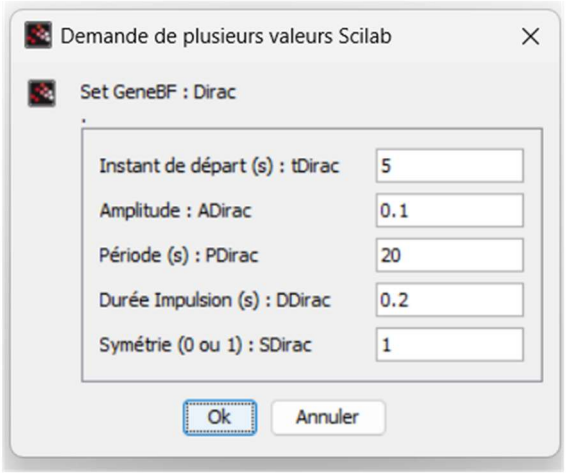


Figure 68 : Paramétrisation du composant DiracSync

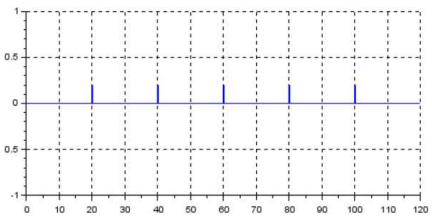
3.8.2.4.2 Fonction réalisée

$y(t) = 0$ si $t < t_0$

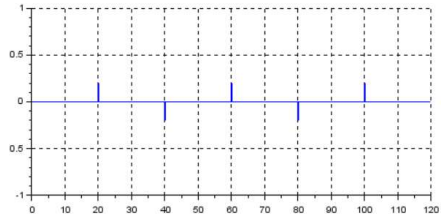
$y(t) = A$ si $t_0 + n.P \leq t \leq t_0 + n.P + D$

$y(t) = 0$ si $t_0 + n.P + D < t < t_0 + (n+1).P$

avec t_0=tDirac, A=ADirac, P=PDirac, D=DDirac



Le booléen « Symétrie » SDirac (0 ou 1) permet d'alterner le sens du Dirac à chaque période du signal :



☞ En général, on programme la durée du Dirac DDirac=0.1 s, pour être aussi compatible avec la période d'échantillonnage des scopes numériques dans HYDROTUR.

3.8.2.5 Aperçu du générateur de fonction Gene_BF avant exécution

Un aperçu du générateur Gene_BF est disponible suite à l'affichage de l'écran de programmation précédent :

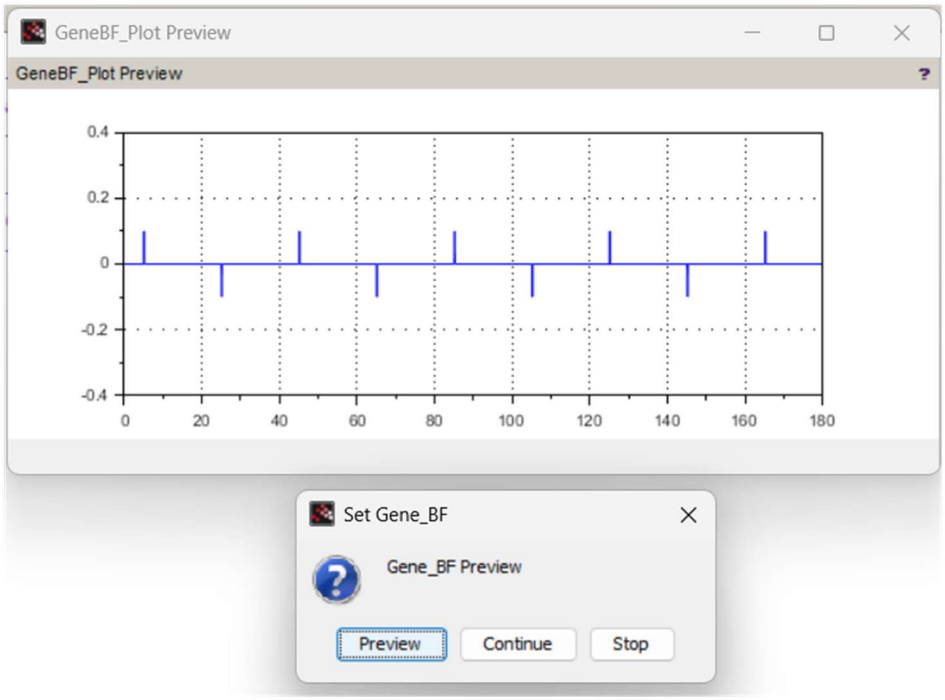


Figure 69 : Aperçu du générateur de fonction Gene_BF avant exécution

- La touche « Preview » trace un aperçu du générateur programmé
- La touche « Continue » permet l'enregistrement du générateur dans le fichier de configuration
- La touche « STOP » termine la session du générateur sans enregistrement.

3.8.2.6 Enregistrement des paramètres du générateur GeneBF

Les paramètres du générateur sont enregistrés dans le fichier de configuration .cfg lié au fichier lancement .sce[6], et dans le même répertoire.

[6] Exemple : Fichier FR2C.cfg si le script de lancement est le fichier FRC2.sce.

```
29  //-----------------------------------------------------------
30  // Perturbations sur le réseau ---------------------------
31  //-----------------------------------------------------------
32
33      //-------------------------
34      // Génétateur BF par défaut
35      //-------------------------
36
37  bPertu=0.000;                          // Type de perturbation (0=Charge - 1=Vitesse) bloc Resea
38  modPer=1.000;                          // Mode de perturbation (0=Echelons 1=SinuSync)
39
40  // Générateur Echelons
41  //---------------------
42  dw1=0.000;                             // Amplitude échelon 1
43  tdw1=10.000;                           // Instant échelon 1 (s)
44
45  dw2=0.000;                             // Amplitude échelon 2
46  tdw2=90.000;                           // Instant échelon 2 (s)
47
48  // Générateur SinuSync
49  //--------------------
50  tSinus=0.000;                          // Instant de départ (s)
51  ASinus=0.100;                          // Amplitude
52  PSinus=90.000;                         // Période (s)
53
54  // Générateur Peigne de Dirac DiracSync
55  //-------------------------------------
56  tDirac=5.000;                          // Instant de départ (s)
57  ADirac=0.100;                          // Amplitude
58  PDirac=20.000;                         // Période (s)
59  DDirac=0.200;                          // Durée du Dirac (s)
60  SDirac=1.000;                          // Symétrie
61
62      //-------------------------
63      // Fin Génétateur BF
64      //-------------------------
```

Figure 70 : Paramètres du programme de test **GeneBF** – Extrait d'un fichier cfg

3.8.2.7 Exemples d'application du perturbographe

Les exemples suivants renseignent de façon exhaustive le comportement du perturbographe dans le fichier « CFG».

Les optimisations en programmation sont à la charge de l'opérateur.

3.8.2.7.1 Échelons de consigne de charge

```
//-----------------------------------------------------------------------------
// Perturbations sur le réseau (GeneBF)
//-----------------------------------------------------------------------------

// Type de perturbation (0=Charge - 1=Vitesse) bloc Reseau
//--------------------------------------------------------
bPertu=0;

// Mode de perturbation (0=Echelons 1=SinuSync)
//---------------------------------------------
modPer=0;

dw1=-0.1;              // Perturbation de charge réseau n°1 (pu)
tdw1=10;               // Instant de perturbation dw1 (s)
;
dw2=-dw1;              // Perturbation de charge réseau n°2 (pu)
tdw2=TSim/2;           // Instant de perturbation dw2 (s)
```

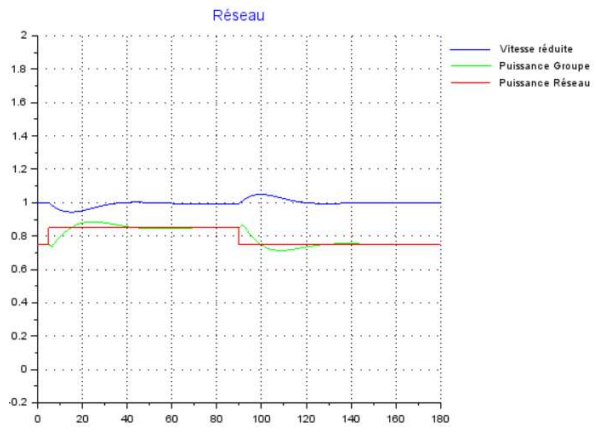


Figure 71 : Réponse à un échelon de charge

3.8.2.7.2 Réponse de la régulation de vitesse à une sinusoïde additionnelle à la consigne de charge

```
//-------------------------------------------------------------------------------
// Perturbations sur le réseau (GeneBF)
//-------------------------------------------------------------------------------

// Type de perturbation (0=Charge - 1=Vitesse) bloc Reseau
//-------------------------------------------------------
bPertu=0;

// Mode de perturbation (0=Echelons 1=SinuSync)
//---------------------------------------------
modPer=1;

// Générateur SinuSync
//--------------------
tSinus=5;                // Instant de départ (s)
ASinus=0.1;              // Amplitude
PSinus=TSim/2;           // Période (s)
```

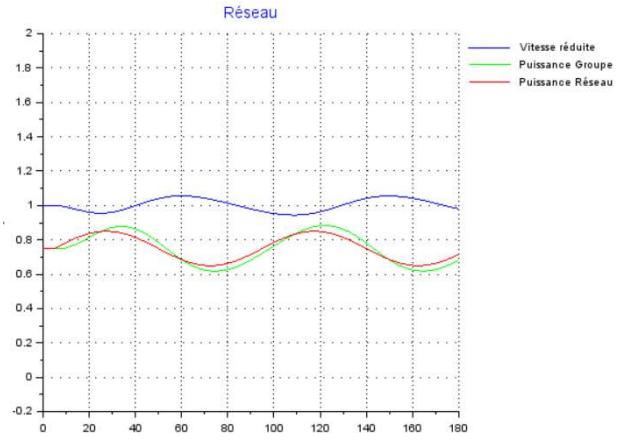


Figure 72 : Poursuite d'une sinusoïde

3.8.2.7.3 Réponse de la régulation de vitesse à un peigne de Dirac sur la mesure de vitesse (réseau interconnecté)

```
// Type de perturbation (0=Charge - 1=Vitesse) bloc Reseau
//-------------------------------------------------------
bPertu=1;

// Mode de perturbation (0=Echelons 1=SinuSync)
//---------------------------------------------
modPer=0;

// Générateur Peigne de Dirac DiracSync
//-------------------------------------
tDirac=20;               // Instant de départ (s)
ADirac=0.1;              // Amplitude
PDirac=20;               // Période (s)
DDirac=0.1;              // Durée du Dirac (s)
SDirac=1;                // Symétrie
```

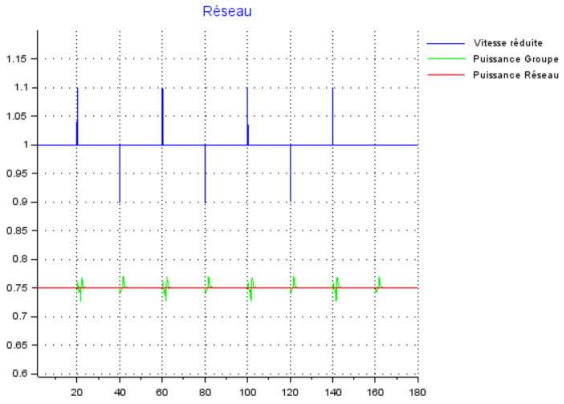


Figure 73 : Réponse de la régulation de vitesse à un peigne de Dirac sur la mesure de vitesse (réseau interconnecté)

3.8.2.7.1 Réponse du régulateur FR2 à un peigne de Dirac (10%) sur la charge (réseau interconnecté)

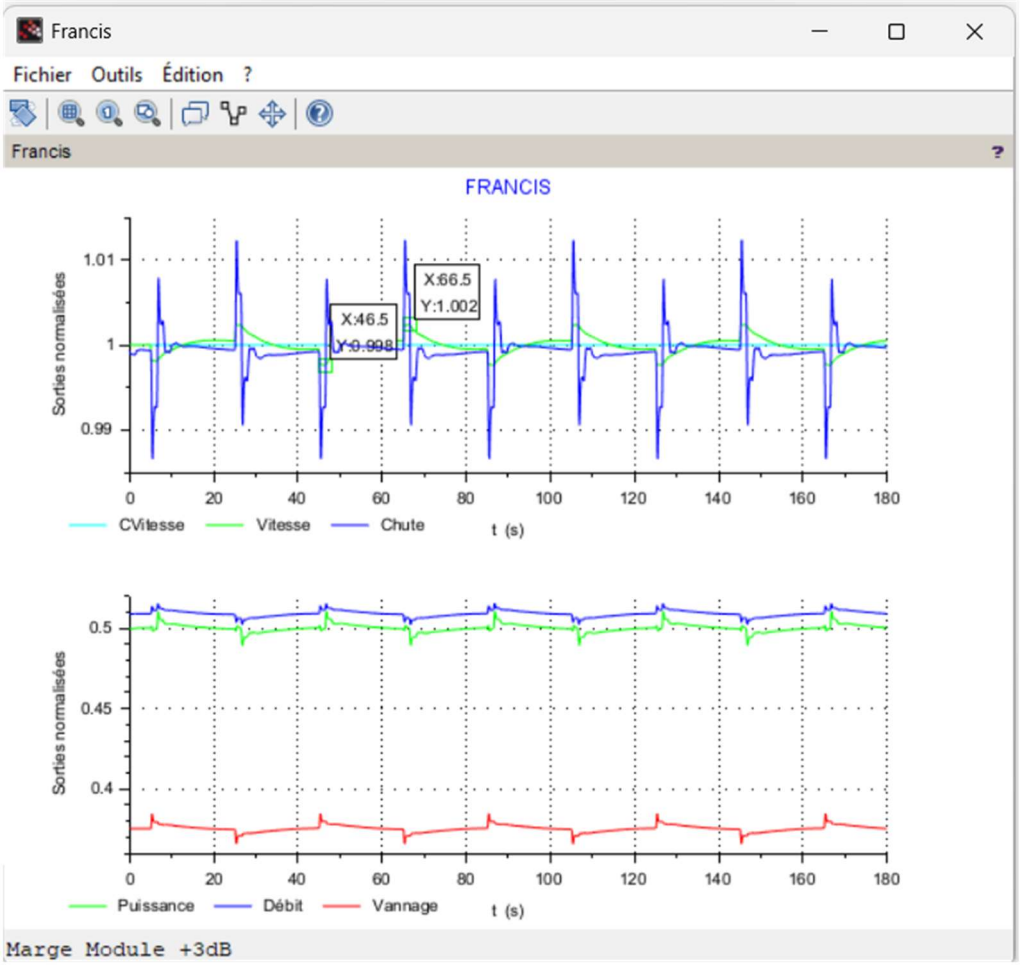


Figure 74 : Réponse du régulateur FR2 à un peigne de Dirac (10%) sur la charge (réseau interconnecté)

3.8.3 Perturbation complémentaire sur la consigne de charge dw3-tdw3

dw3	Amplitude de l'échelon de perturbation n°3 (pu)	CC - XLS
tdw3	Instant d'application de l'échelon de perturbation n°3 (s)	CC - XLS

Les deux paramètres programment l'ajout d'une rampe de charge complémentaire à celle du consignateur principal.
Ce dispositif peut être utilisé, par exemple, pour des ralliements à 100% de charge dans la simulation du circuit hydraulique, après un palier de de stabilisation à 50%.

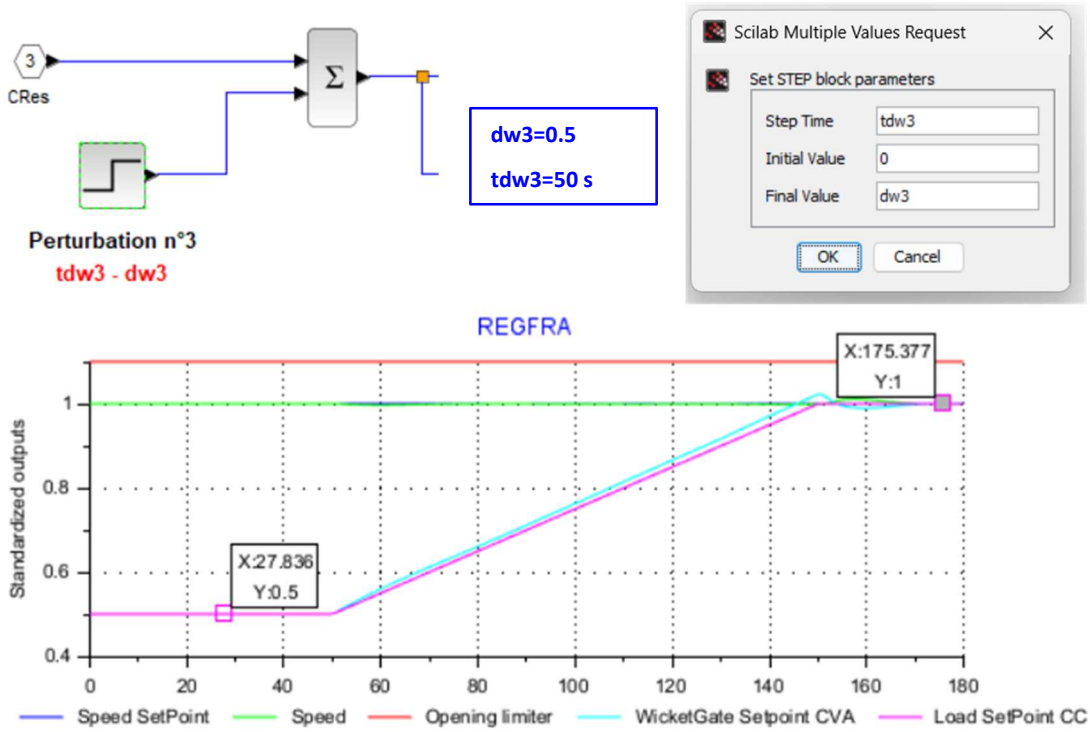


Figure 75 : Perturbateur de consigne n°3 de Charge/Débit/Puissance dans le module CC

3.9 Loi de rendement REND en fonction de l'ouverture

REND	Loi de rendement en fonction de l'ouverture (pu)	General - XLS
xRend **yRend**		

À partir d'une table de 2-uplets (xRend, yRend), cette loi prend en compte le rendement de la machine dans le calcul de la puissance mécanique fournit par le groupe hydraulique, suivant la loi :

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

où η est la loi de rendement *Rend*.

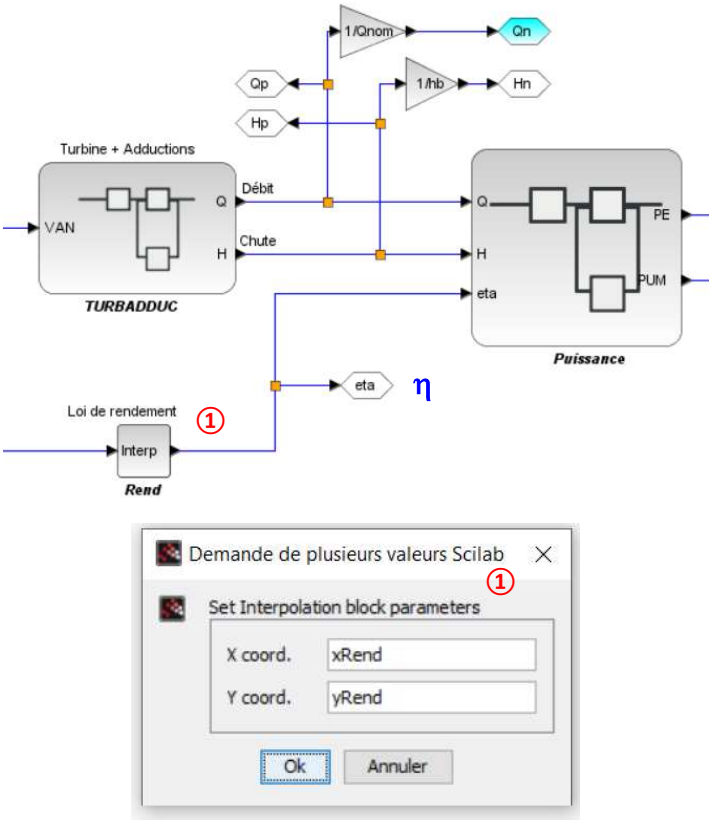


Figure 76 : Prise en compte de la loi de rendement Rend dans le module principal FR2

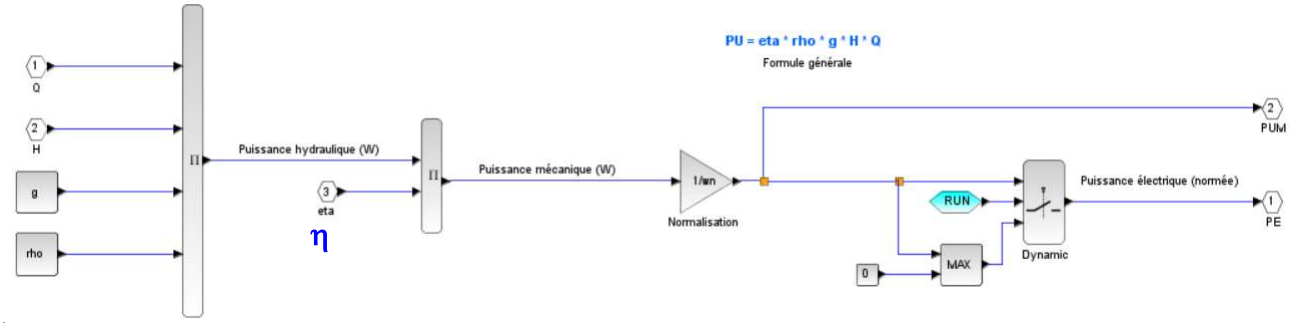
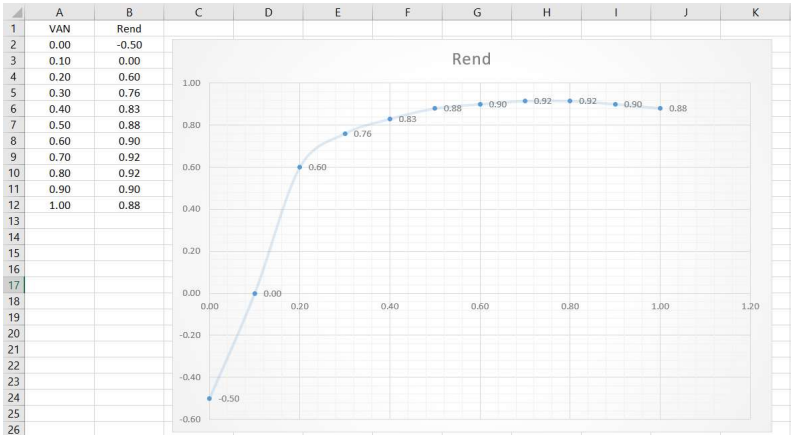


Figure 77 : Prise en compte du rendement dans le module Puissance du circuit FR2



	A	B
1	VAN	Rend
2	0.00	-0.50
3	0.10	0.00
4	0.20	0.60
5	0.30	0.76
6	0.40	0.83
7	0.50	0.88
8	0.60	0.90
9	0.70	0.92
10	0.80	0.92
11	0.90	0.90
12	1.00	0.88

Figure 78 : Exemple de loi de rendement dans le circuit FR2 (Fichier FR2 - Lois.xlsx)

☞ Une loi de rendement est définie par défaut dans le fichier « **VariablesGlobales.sce** ». Ce fichier est chargé au lancement de toute simulation, et positionné dans le répertoire « **HydroSim\macros**» :

```
//-----------------------------------------------------------------------------------------------------------
// Loi Rendement par défaut
// Si cette loi ne convient pas, il convient de la reprendre en surchargeant
// le fichier de paramétrisation  "XLS" avec une nouvelle relation (xRend, yRend) dans une feuille REND
//-----------------------------------------------------------------------------------------------------------
Rend=[];
REND=[];        // Rendement si défini dans la feuille XLS

xRend=[0.00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70 0.80  0.90 1.00];    //Ouverture
yRend=[0.00 0.75 0.85 0.88 0.9 0.905 0.91 0.91 0.905 0.90 0.89];    //Rendement
;
```

Figure 79 : Loi de rendement est définie par défaut dans le fichier « **VariablesGlobales.sce** »

☞ La loi rendement est parfois directement intégrée dans une colline Machine (FR4, FR5, KB). Dans ce cas, la multiplication par η n'est pas nécessaire.

La loi de rendement peut également être redéfinie dans une feuille REND du fichier XLS :

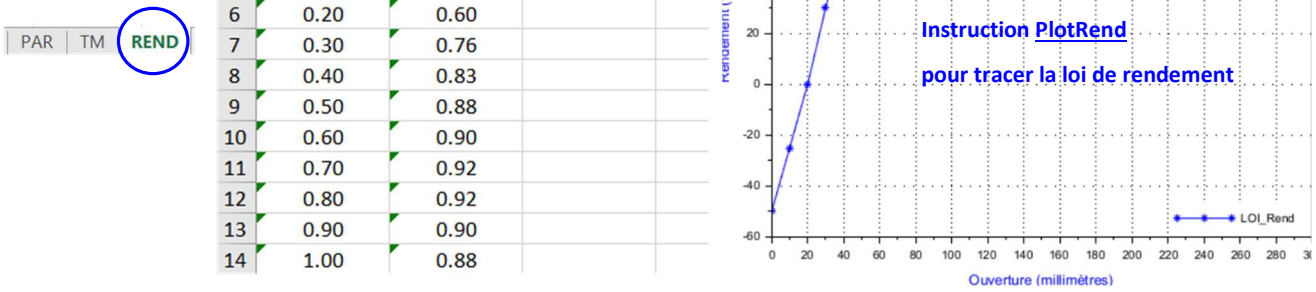


Figure 80 : Loi de rendement définie dans le fichier HydroSim\demos\KAPLAN\KB1\Standard\KB1.xls

. La loi de rendement est traçable en saisissant PlotRend dans la console Scilab (*Voir aussi Figure 174*).

3.10 Module de freinage CFRIC

kFric	Coefficient de friction du groupe turbo-alternateur (pu)	CFRIC - XLS
kFrein	Coefficient de freinage (pu)	CFRIC - XLS
SFrein	Seuil de freinage (pu)	CFRIC - XLS

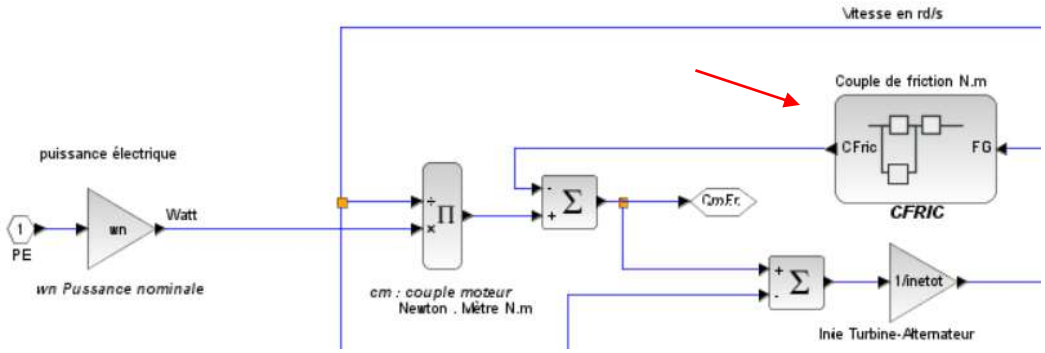


Figure 81 : Application du couple de friction dans le module Reseau

Le coefficient de friction **kFric** représente un pourcentage du couple maximale **wn/om0** pour amener la machine de la vitesse nulle à sa vitesse nominale en Marche à vide.

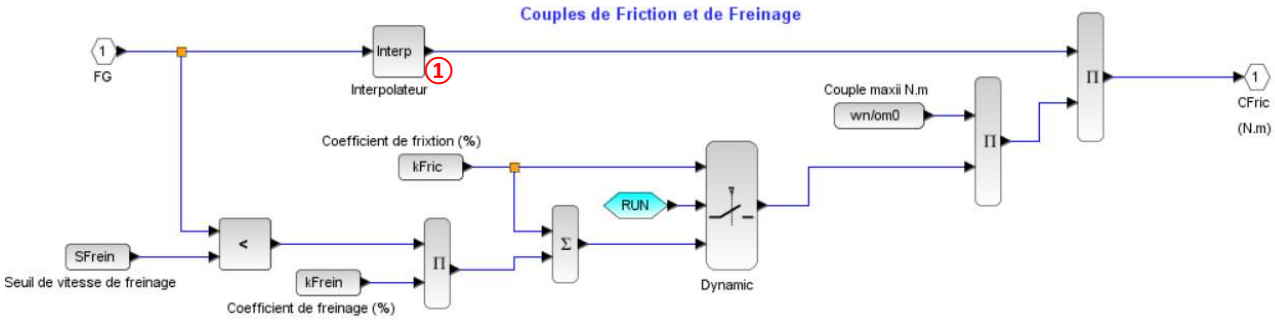


Figure 82 : Mode Couples de Friction et de Freinage CFRIC

Lors d'un déclenchement du groupe turbo-alternateur, avec arrêt machine (MoDECL=0, RUN=0), il est possible d'adjoindre un couple de freinage électrique (ou hydraulique, contre-jet machine PELTON par exemple), permettant d'accélérer ou retarder le retour à vitesse nulle lorsque la machine est sur son inertie propre.

①

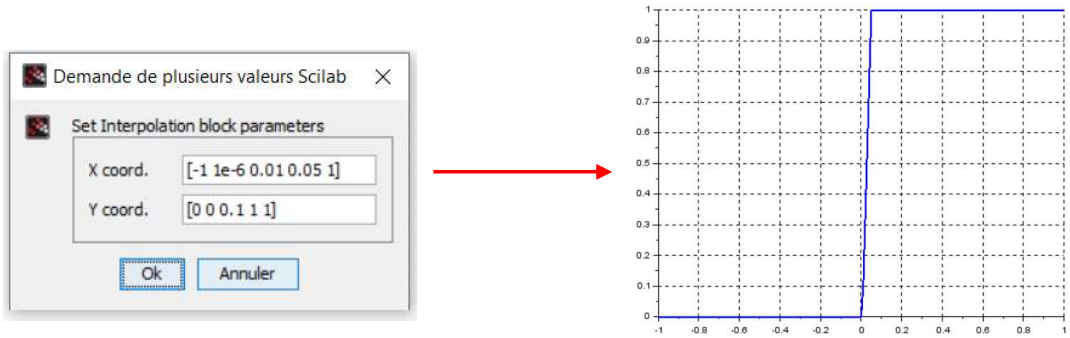


Figure 83 : Interpolateur dans le module CFRIC

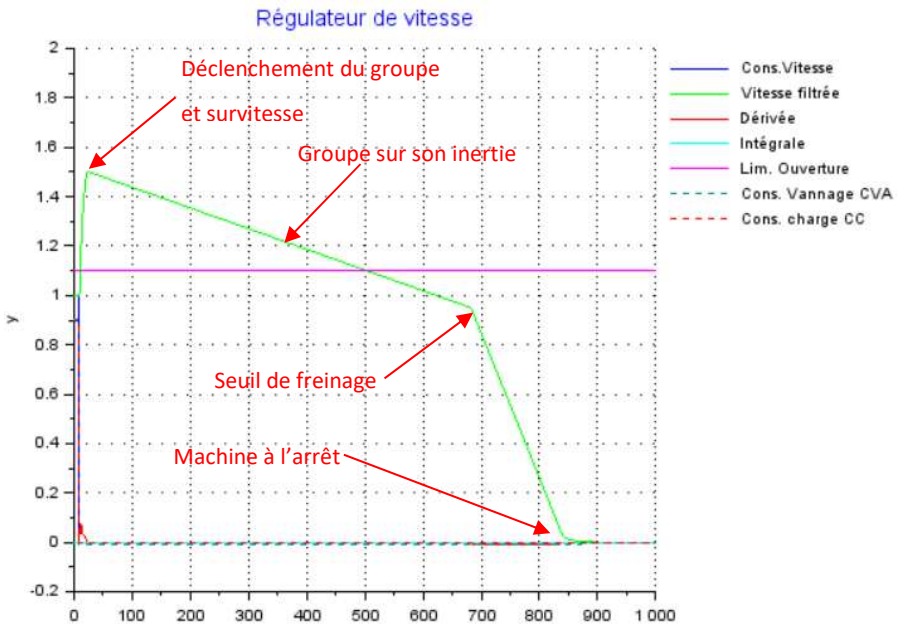


Figure 84 : Déclenchement du groupe et arrêt machine (MoDECL=0)

3.11 Resynchronisation Sync de l'intégrateur vitesse

3.11.1 Principe d'activation

L'intégrateur vitesse est un point clef délicat à maitriser dans la régulation.

Il est nécessaire parfois de contrôler son efficacité afin d'améliorer les régimes transitoires dans le fonctionnement de la machine :

- Lors de la fermeture du disjoncteur de groupe (évènement DJF)
- Lors des régimes en sous ou survitesse (évènement Sync1)
- Sur une prise de charge de la machine (évènement Sync2)
- Lors d'un déclenchement du groupe (évènement RDECL)
- …Autres

Un dispositif est spécialement conçu pour prévoir la remise à 0 de l'intégrateur vitesse sur synchronisation des évènements décrits ci-dessus (liste non exhaustive).

Ce mécanisme, commun à l'ensemble des modèles proposés est décrit dans le module « **Système** » des programmes et des schémathèques. L'ensemble des synchronisations sont portées sur un signal unique nommé « **Sync** », et provoquant la remise à 0 de l'intégrateur vitesse :

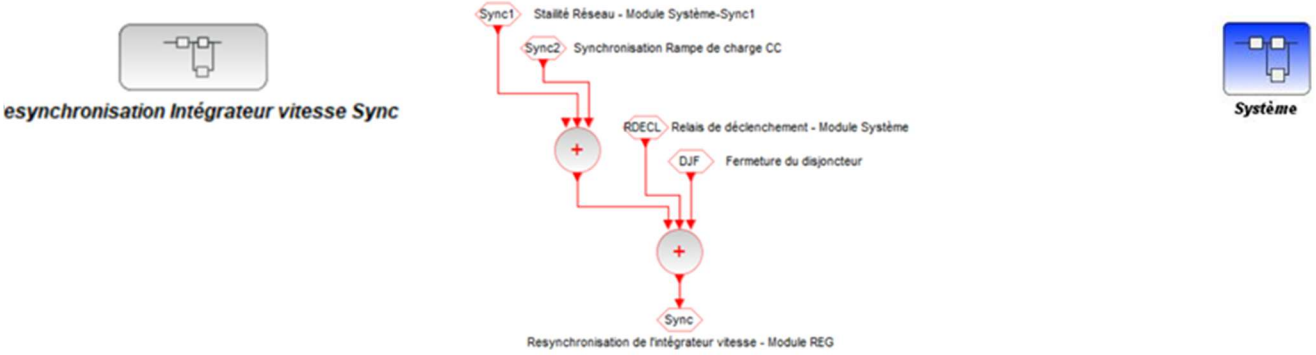


Figure 85 : Mécanisme de resynchronisation de l'intégrateur vitesse

Chaque signal de resynchronisation est associé à un booléen de validation de l'option. Si le booléen est à valeur nulle, la synchronisation attenante n'est pas émise (bRDELC pour RDECL, bSync1 pour Sync1, bSync2 pour Sync2).

L'utilisation de ces relais de synchronisation est à étudier au cas par cas dans chaque modèle, et dépend de la robustesse des paramètres de stabilité.

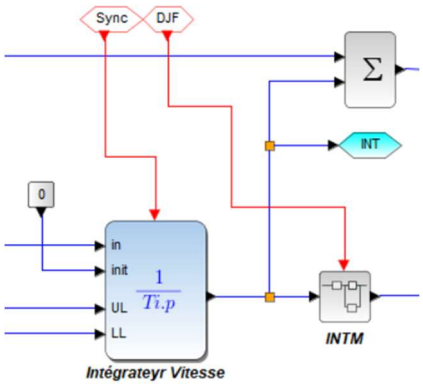


Figure 86 : Remise à 0 impulsionnelle de l'intégrateur vitesse sur réception du signal Sync

3.11.2 Relais de survitesse en déclenchement machine RDECL

bRDECL	Validation du relais RDECL (0 : Invalidation – 1 : Validation (valeur par défaut))	Système - XLS
P_RDECL	Seuil minimal de puissance pour la mise en œuvre du relais RDECL (pu)	Système - XLS
SvOn1	Relais de survitesse RDSV (pu)	Système - XLS
SvOff1	Relais de survitesse RDSV (pu)	Système - XLS
SyncErr	Seuil d'erreur en position pour la reprise en régulation (pu) (resynchronisation)	Système - XLS

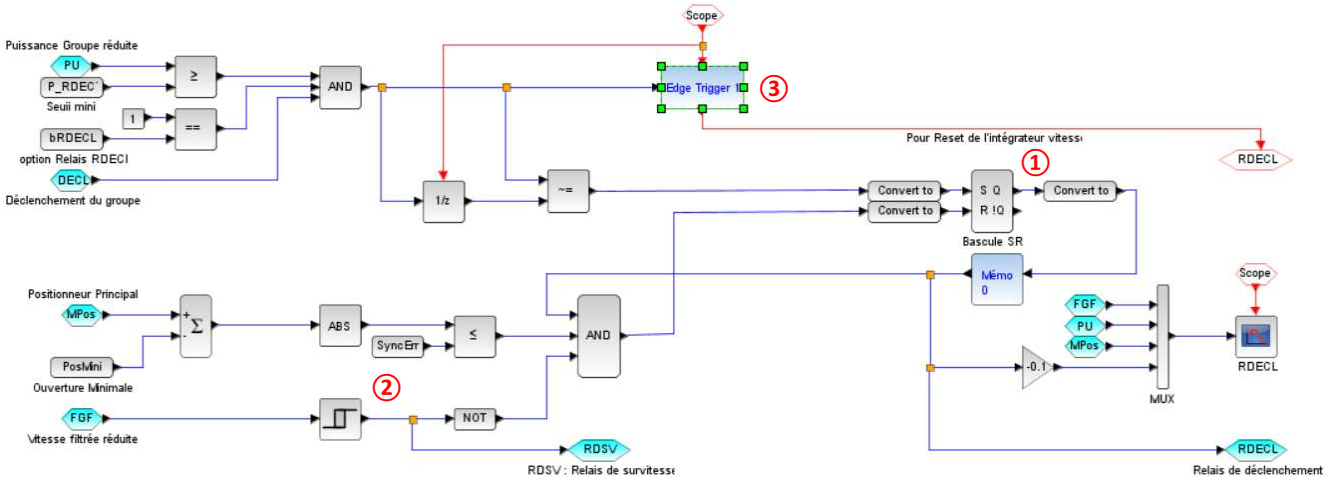


Figure 87 : Diagramme du Relais de déclenchement RDECL

S	R	Q_n	$!Q_n$	①
0	0	Q_n	$!Q_n$	Maintien
0	1	0	1	Remise à 0
1	0	1	0	Mise à 1
1	1	I	I	Etat interdit

Figure 88 : Table de vérité de la bascule RS

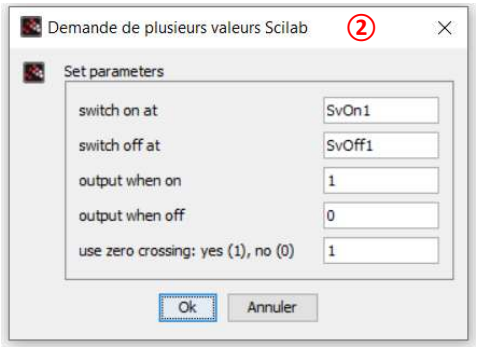


Figure 89 : Hystérésis du relais de survitesse dans le module RDECL

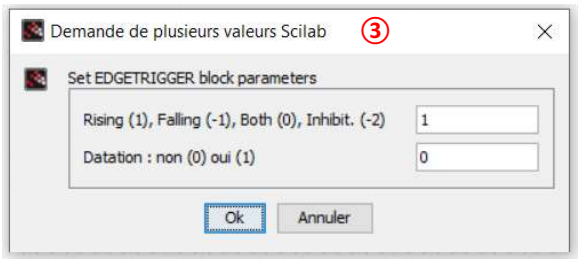


Figure 90 : Détecteur de front - Armement de la bascule RDECL

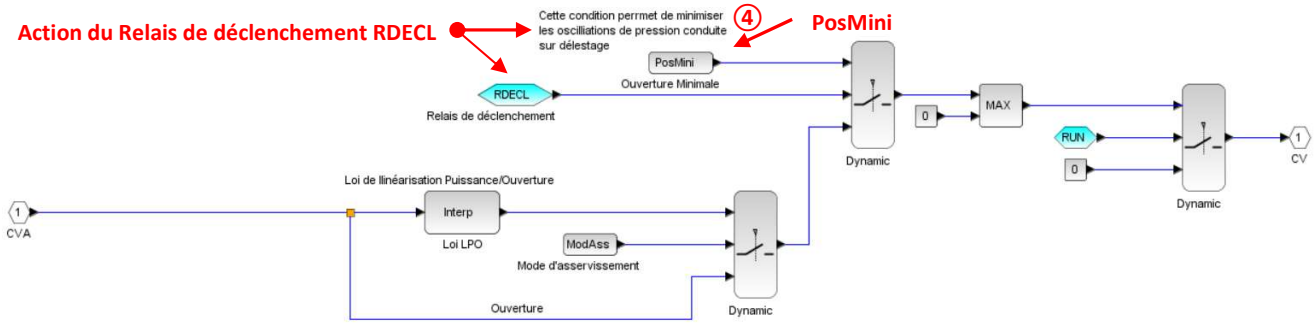


Figure 91 : Action du relais de déclenchement RDECL sur le pré-positionnement de l'organe de réglage (bloc LINE)

Le relais de déclenchement **RDECL** est structuré autour d'une bascule RS ①.
Il provoque, dans certaines conditions, un passage automatique du groupe en mode MANUEL, en ordonnant un pré-positionnement des organes de réglages à une ouverture minimale PosMini programmable ④, à optimiser, souvent proche de la marche à vide, suivant le cas de figure (*voir aussi MoDECL, Figure 41, Figure 42*).
Ce dispositif permet d'atténuer les suppressions dans les conduites à contrôlant le bélier d'onde généré.
Le relais de déclenchement ne peut être appliqué qu'à partir d'un seuil de validation en puissance **PU≥P_RDECL**..
La séquence s'achève par une remise à 0 de la bascule SR ②, mémoire du relais RDECL, sur un seuil de vitesse programmé autour d'une hystérésis SvOn1 et SvOff1, Dans ce cas, le groupe repasse automatiquement en mode d'asservissement à la vitesse.

Ce dispositif réinitialise l'intégrateur à 0 lors dans une séquence de déclenchement (*voir Figure 31*)

3.11.3 Détecteur de stabilité du réseau - Bloc de reconditionnement de l'intégrateur Vitesse Sync1

bSync1	Option de resynchronisation de l'intégrateur vitesse sur seuils de survitesse ou sous-vitesse (su)	CI - XLS
SvOn2	Relais de survitesse Module Sync1 (pu)	CI - XLS
SvOff2	Relais de survitesse Module Sync1 (pu)	CI - XLS
SvOn3	Relais de sous-vitesse Module Sync1 (pu)	CI - XLS
SvOff3	Relais de sous-vitesse Module Sync1 (pu)	CI - XLS
TPStab	Temporisation pour détection de retour à un réseau stable (s)	CI - XLS
StabH	Seuil Haut de détection de réseau stable (pu)	STABRES - XLS
StabL	Seuil Bas de détection de réseau stable (pu)	STABRES - XLS

☞ L'objet de l'algorithmique exposé dans la figure ci-dessous, est de maitriser l'excursion de l'intégrateur vitesse afin d'éviter toute trainée de celui-ci, dans les transitoires en charge de la machine.

Ce mécanisme produit, sur option bSync1, un évènement **Sync1** permettant la resynchronisation de l'intégrateur Vitesse.

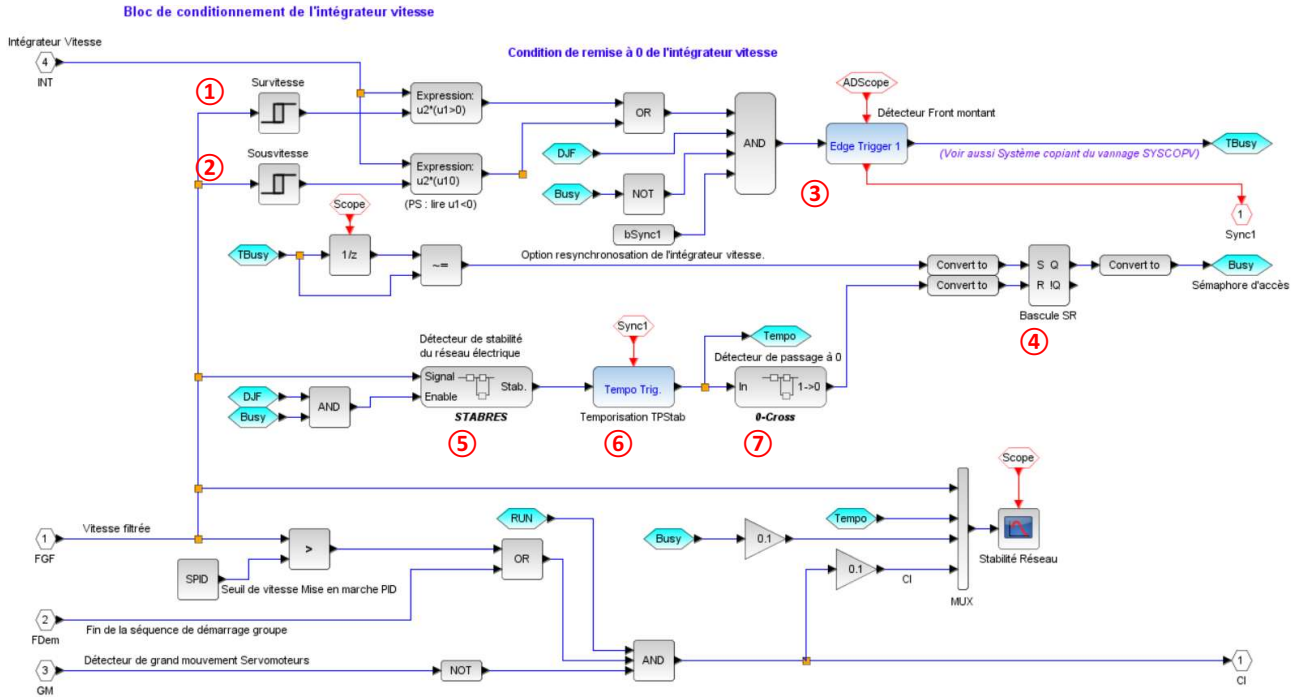


Figure 92 : Module Système - Relais de resynchronisation Sync1

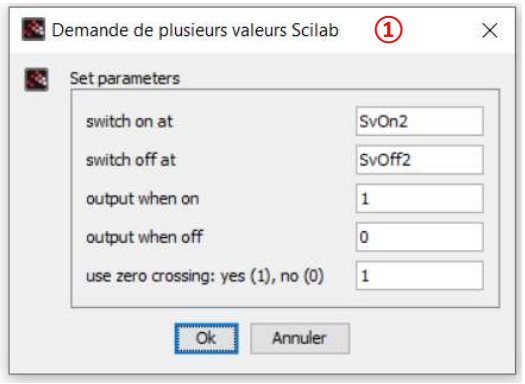


Figure 93 : Relais de survitesse - KB

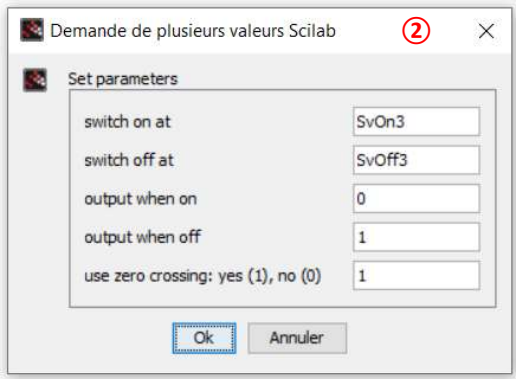


Figure 94 : Relais de sous-vitesse – KB

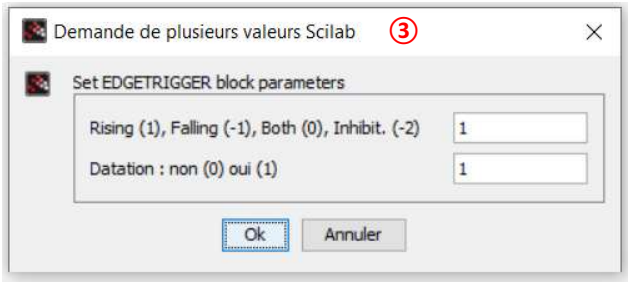


Figure 95 : Déclencheur **Sync1** avec datation **TBusy**

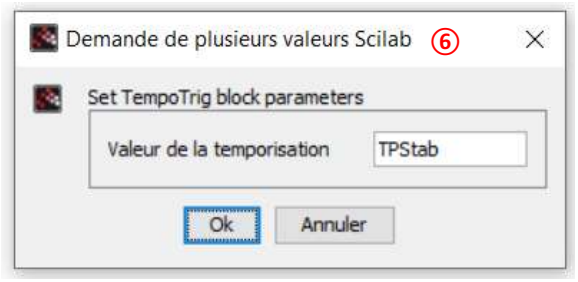


Figure 96 : Temporisation ré-armable de détection de retour en régime stabilité du réseau électrique

Le composant ③ génère la resynchronisation **Sync1**, et son option Datation=1 mémorise la date de l'évènement sur la variable **TBusy** (voir module SYSCOPV pour utilisation).

Si l'entrée du Temporisateur ⑥ vaut 1, sa sortie est alors forcée = 1 (réarmement, voir *Figure 97*)

Sinon, la sortie de temporisation évolue selon une rampe de constante de temps $\frac{-1}{TPStab}$

Un front de détection à valeur nulle, objet du composant ***0-Cross*** ⑦, génère un reset de la bascule RS ④.

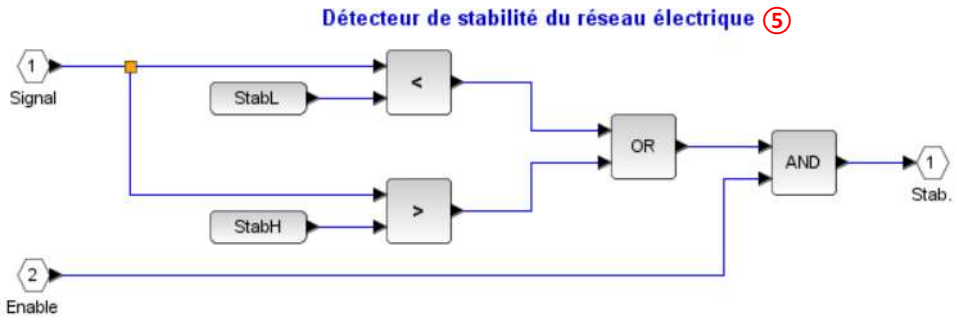


Figure 97 : Détecteur de stabilité du réseau électrique – Module STABRES

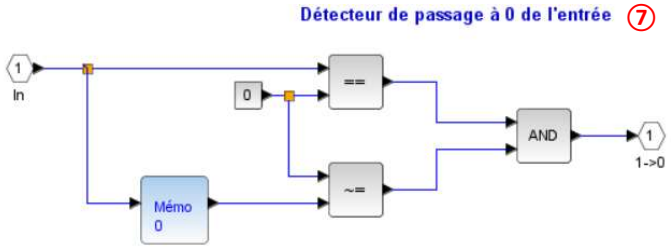


Figure 98 : Détecteur de fin de temporisation - Retour en réseau stable – Module 0-Cross

Un mécanisme structuré autour d'un bascule RS ④, permet de maîtriser le régime transitoire d'un groupe Kaplan couplé au réseau électrique.

1) L'ensemble groupe turbo-alternateur, et le réseau électrique sont dans un état stable au lancement de la simulation. Le groupe est exploité à une certaine puissance.
Lors d'une prise de charge, ou un délestage partiel de la charge, une variation de fréquence du réseau peut amener le déclenchement des relais avec hystérésis de survitesse ① ou de sous-vitesse ②, pour les seuils programmés.

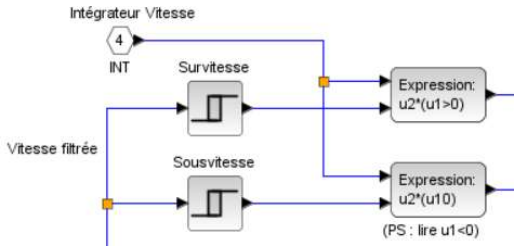


Figure 99 : Conditions d'enclenchement du relais vitesse pour le contrôle de l'intégrateur vitesse - KB

La condition d'armement est liée à la valeur de l'intégrateur vitesse, afin de le maintenir dans son rôle actif, ou bien de décider de sa remise à 0 s'il est en position défavorable dans la séquence observée, soit :

- Seuil de survitesse **SvOn2** détecté **ET** Intégrateur **INT>0**
- Seuil de sous-vitesse **SvOn3** détecté **ET** Intégrateur **INT<0**

Si le système n'a pas encore été armé (Busy=0), alors il le devient (**Sync1**) par une détection de front montant sur le composant ③, dont l'effet est d'armer à 1 la bascule RS ④ et de positionner la variable Busy=1.
Une première conséquence de cette détection est également une remise à 0 du registre Intégrateur du PID vitesse (*voir Figure 85 et Figure 86*), et un armement de la temporisation ⑥.

2) Dès lors, le procédé attend une restabilisation du réseau dans la fourchette [StabL—StabH] pour remettre à 0 la bascule RS ④. Par conséquent, l'intégrateur n'est plus remis à 0 avant cette fin de séquence.

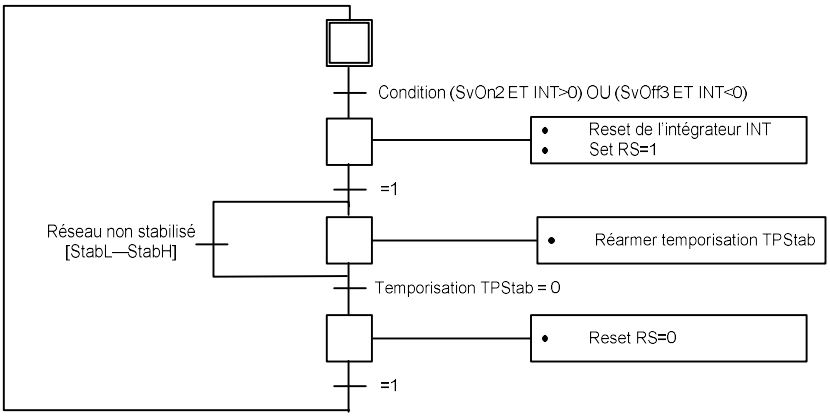


Figure 100 : Grafcet simplifié de resynchronisation Sync1

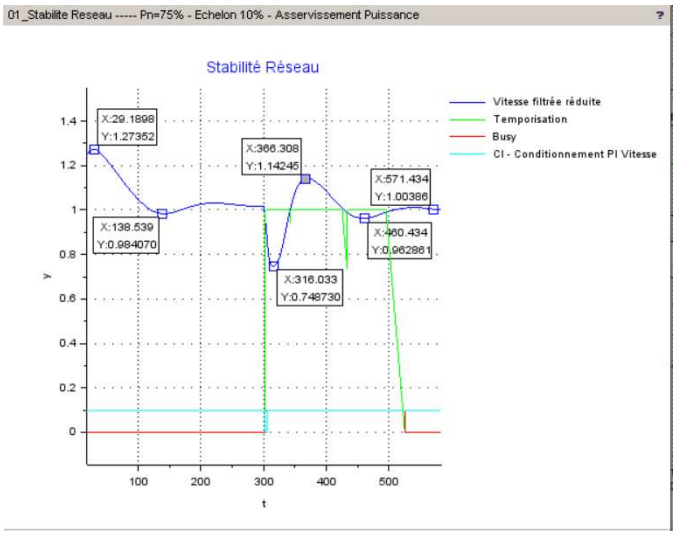


Figure 101 : Graphe de resynchronisation KB

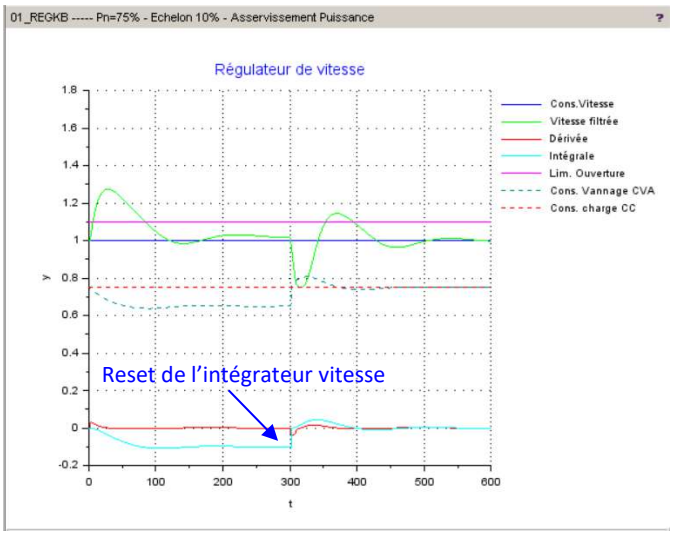


Figure 102 : PID vitesse - Remise à 0 de l'intégrateur INT

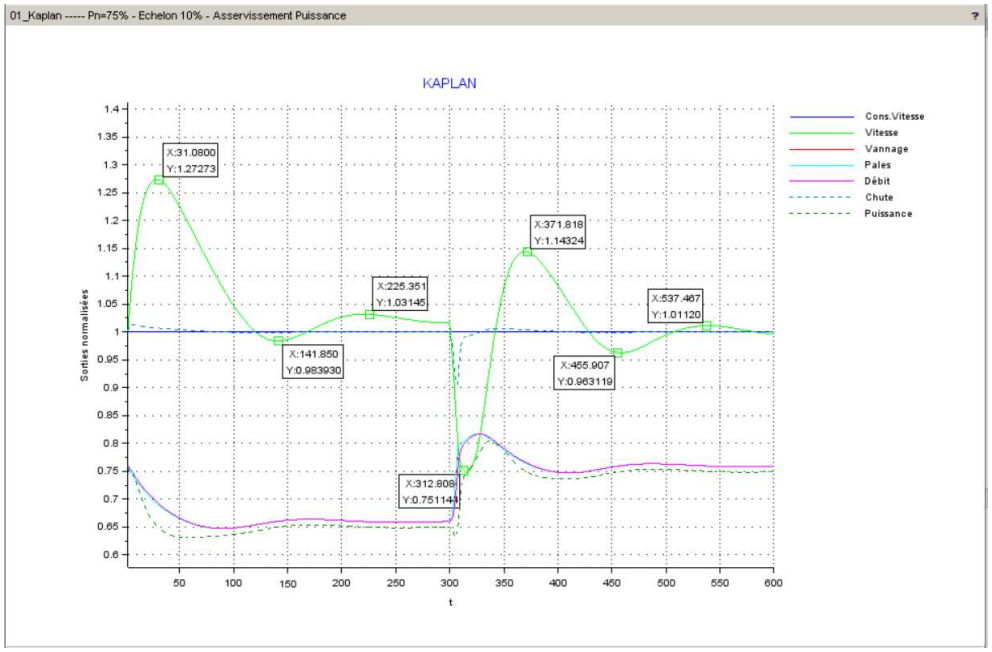


Figure 103 : Transitoire Kaplan 75% PW - Échelon 10%

3.11.4 Relais de resynchronisation Sync2 sur prise de charge – Accostage de la rampe de charge

bSync2	Option resynchronisation de l'intégrateur vitesse en fin de prise de charge	CC - XLS

L'objet de l'option de resynchronisation **Sync2** de l'intégrateur vitesse, est de réaliser un reset de ce registre en fin de prise de charge, afin d'optimiser l'accostage, suite à la trainée du PID vitesse dans sa poursuite sur rampe de la consigne de charge.

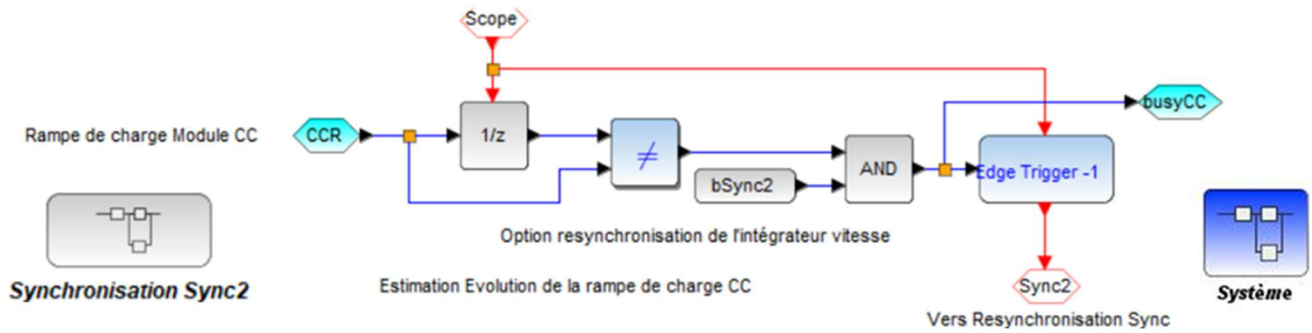


Figure 104 : Synchronisateur Sync2 - **Accostage de la rampe de charge**

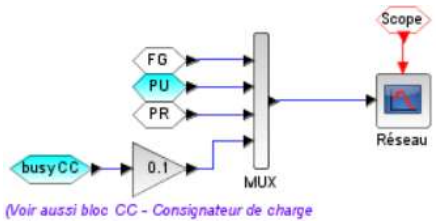


Figure 105 : Visualisation du relais BusyCC dan le module Reseau

Dans la ***Figure 104***, on introduit un retard pur z^{-1} sur la rampe de charge, puis un comparateur entre la valeur courante et la valeur retardée. Le relais **busyCC** donne l'état de cette comparaison, lorsque l'option **bSync2** est validée à 1 :

- Tant que la rampe n'a pas atteint sa valeur finale, **busyCC**=1
- Lorsque la rampe atteint sa valeur finale, **busyCC**=0

- Sur détection d'un front descendant du relais **busyCC**, un signal de resynchronisation **Sync2** est émis vers l'intégrateur vitesse, et le remet instantanément à 0 (voir Figure 85 et Figure 86*)*.

- L'état du relais peut être visualisé dans le scope « Reseau ».

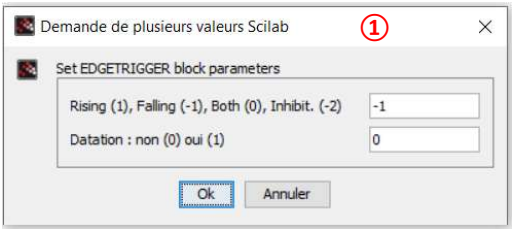


Figure 106 : Programmation de la détection d'un front descendant

Les séquences présentées ci-dessous sont disponibles dans le répertoire d'étude de stabilité : **HydroSim\demos\KAPLAN\KB1\10 – Sites\0 – Standard\0 - Études stabilité\Pn=50% - Rampe 75% - Essais bSync2.**
La simulation démarre Groupe couplé au réseau (TDFJ=0), à 50% de charge (CResau=0.5), en asservissement à la puissance (ModAss=1).

On utilise de pertubographe n°3 sur la Rampe de charge, indiqué dans le module CC du simulateur KB (*voir Figure 75*)

Au temps tdw3=10 s, on réalise une prise de charge de +25% (dw3=0.25) pour amener le groupe de 50% à 75% de charge.
Pour un temps de rampe TRamp=300 s, le ralliement à 75% est donc réalisé au temps t=10 s + 75 s = 85 s.

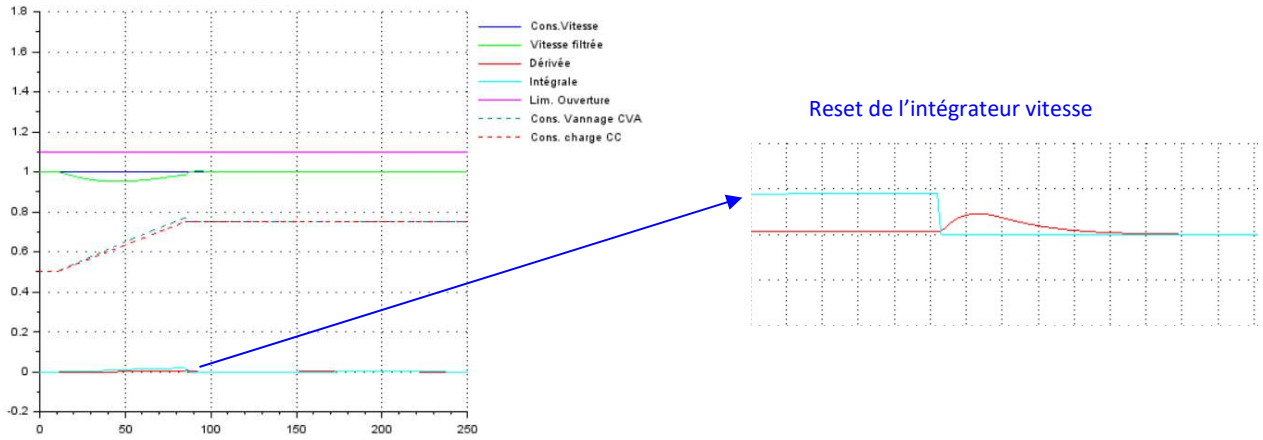


Figure 107 : Remise à 0 de l'intégrateur vitesse sur resynchronisation Sync2



Figure 108 : Rampe de charge KB1 - Pn=50% - Rampe 75% - bSync2=1

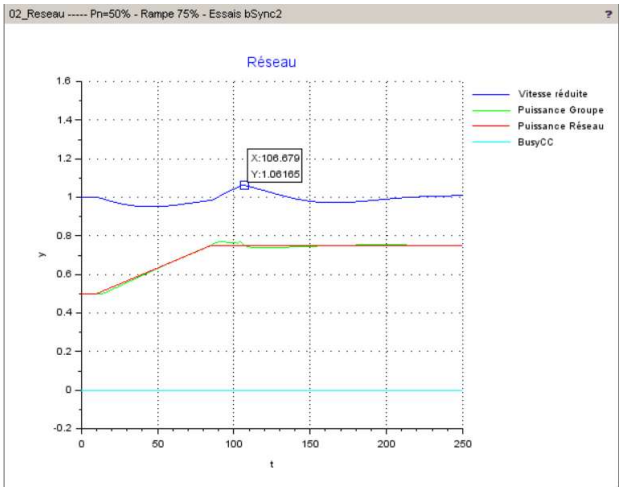


Figure 109 : Rampe de charge KB1 - Pn=50% - Rampe 75% - bSync2=0

3.12 Systèmes copiants SYSCOP (Vannage ou Injecteurs – Turbines Francis-Kaplan-Pelton)

3.12.1 Circuit oléohydraulique

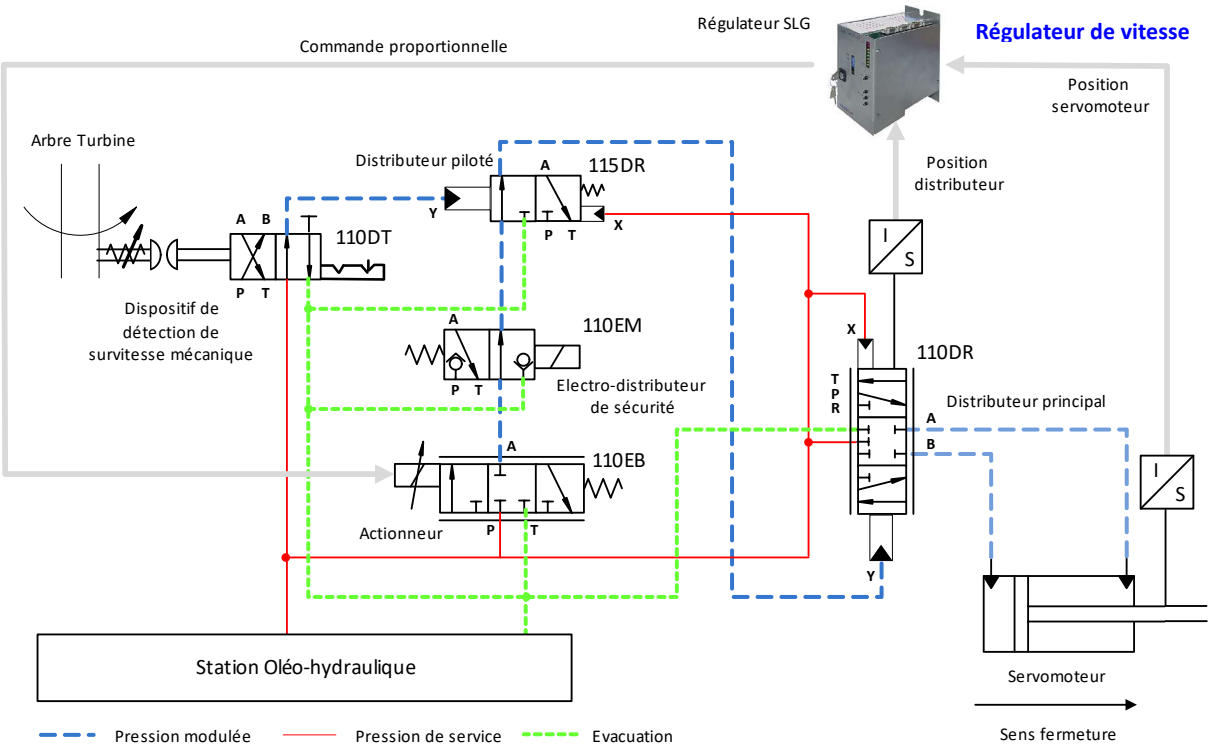


Figure 110 : Schéma oléohydraulique simplifié de commande de l'organe de réglage – Système copiant **[10]**

Le régulateur de Vitesse/Position SLG pilote électriquement un actionneur 110EB (Soupape), pilotant lui-même un préamplificateur oléohydraulique 110DR, agissant sur les chambres du servomoteur à commander.

3.12.2 Schéma de réglage

3.12.2.1 Turbines FRANCIS

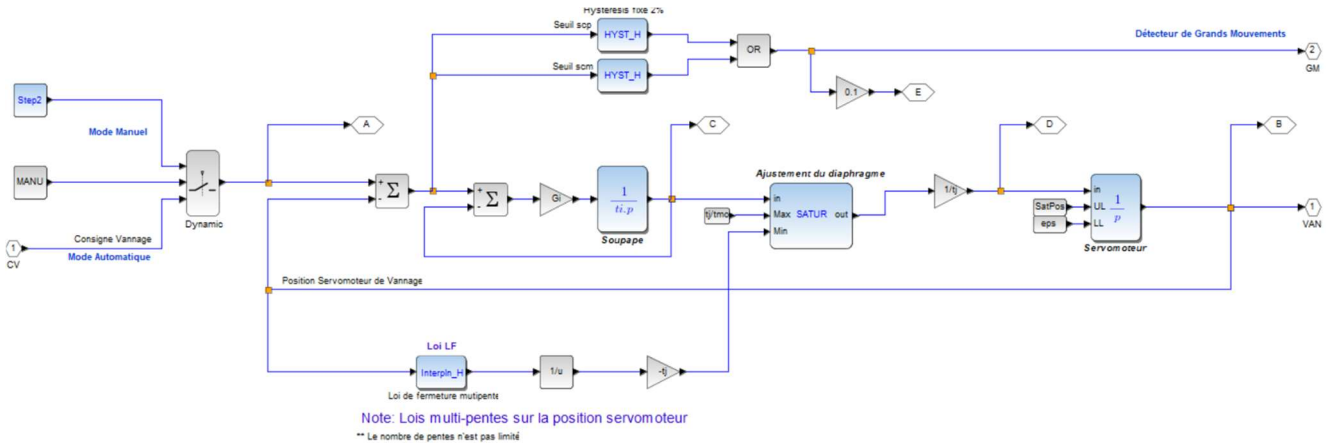


Figure 111 : Bloc de positionnement du servomoteur SYSCOP – Vannage

3.12.2.2 *Turbines PELTON axe horizontal ou vertical avec répartiteur de Jets en option*

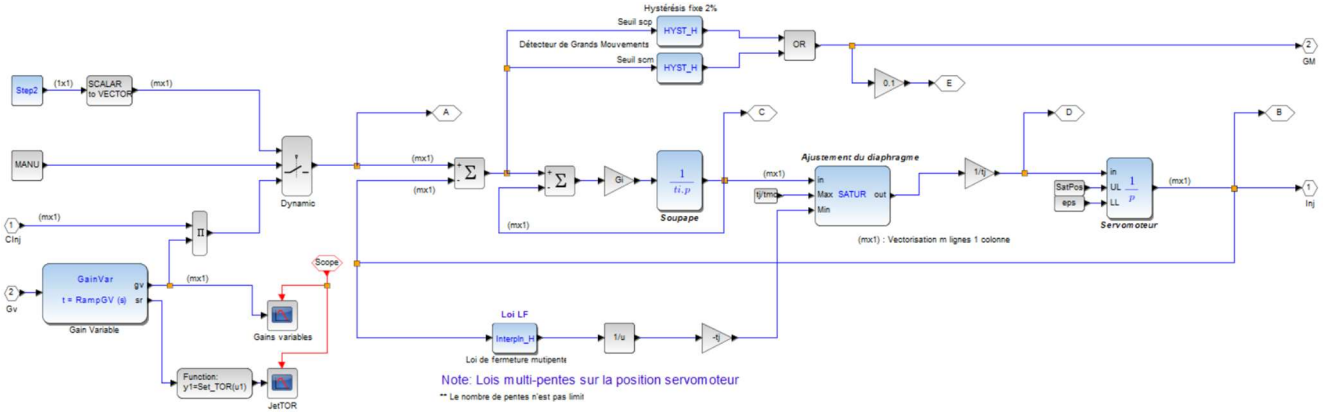


Figure 112 : Bloc de positionnement du servomoteur SYSCOP – Injecteur

Le circuit SYSCOP pour turbine PELTON est voisin du circuit Francis, mais comprend un terme supplémentaire nommé « Gain Variable », adaptant le gain de l'injecteur en fonction des ordres transmis par le Répartiteur de Jets associé, en fonction de la puissance demandée, pour les turbines à axe vertical.

Pour les turbines à **axe horizontal** 1 ou 2 jets, dévalider systématiquement la fonction répartiteur en programmant **RepOnOff=0**.

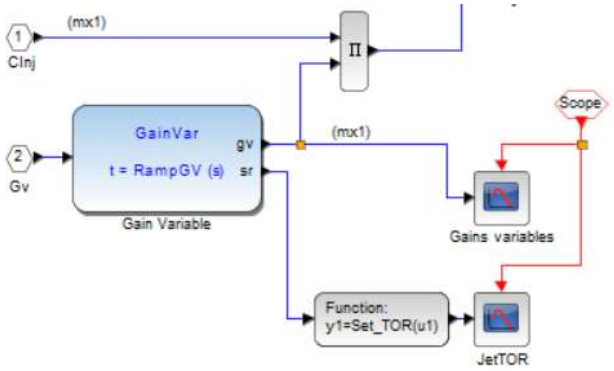


Figure 113 : Adaptation du Gain Variable dans les turbines PELTON - Axe vertical

Ce circuit est commun à l'ensemble des groupe PELTON de 1 à 6 jets, et est écrit sous forme vectorielle (nx1), (n lignes 1 colonne), ou n est le nombre de jets de la machine. Il n'y a donc qu'un seul schéma couvrant tous les cas de figure.

3.12.3 Réglage du PID Positionneur Francis-Injecteur

tj_	Constante de temps de l'intégrateur Servomoteur (s)	SYSCOP - XLS
ti_	Constante de temps de l'intégrateur Soupape (s)	SYSCOP - XLS
Gi_	Gain Soupape (su) (GI=5.0 par défaut)	SYSCOP - XLS

SatPos	Saturation maximale de l'excursion servomoteur (pu)	SYSCOP - XLS

SatPos correspond à une saturation maximale du servomoteur de vannage, donc à une sur-ouverture lorsque le point de fonctionnement nominal n'est pas positionné à l'ouverture maximale de la course servomoteur (100%).

3.12.4 Réglage des temps de manœuvres des organes de réglage en ouverture et en fermeture par une loi LF multipente

tmo	Temps de manœuvre du servomoteur à l'ouverture (s)	SYSCOP - XLS
LF_	Loi de fermeture multipente des organes de réglage (mm ou pu / s) – Calcul des temps de manœuvre à la fermeture selon la loi LF	SYSCOP - XLS

Les temps de manœuvre correspondent aux temps d'ouverture (① tmo) ou de fermetures (② + ③), calculés à partir de la loi programmable **LF**, pour une course de 100% du ou des servomoteurs.

Le diaphragme est automatiquement ajusté en fonction de la position du servomoteur, et du sens du mouvement à prendre en compte.

Le réglage de la machine en fermeture correspond au meilleur compromis entre la survitesse et la surpression conduite pour un délestage à 4/4 de la machine.

Le temps de manœuvre rapide permet généralement d'éviter une survitesse trop importante, tandis que le ou les temps de fermeture lents minimisent les oscillations dans la conduite générée par la fermeture de l'obturateur, donc du vannage.

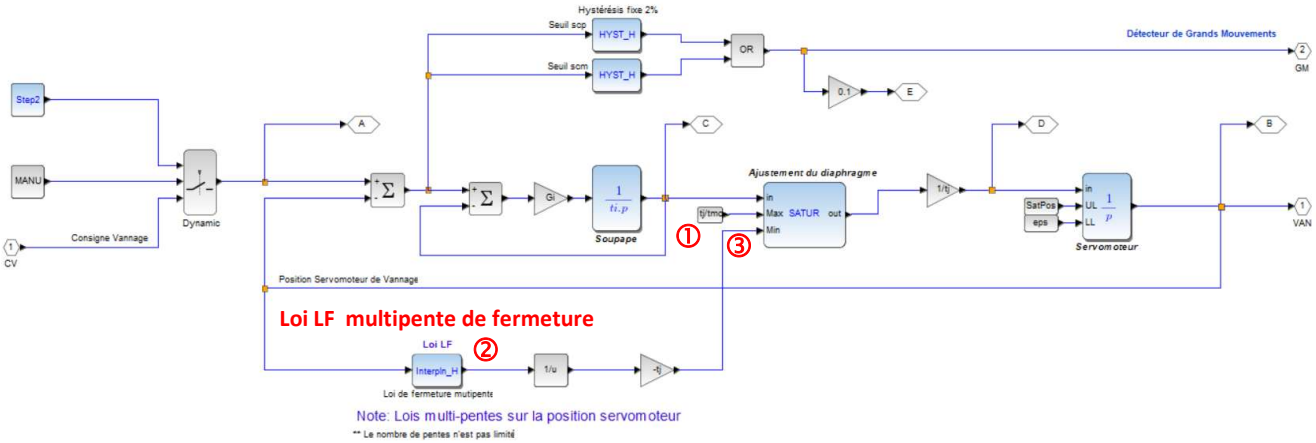


Figure 114 : Module SYSCOP d'asservissement du système copiant du vannage dans HydroSim

La loi de fermeture **LF** à programmer, est une loi bi-dimensionnelle portant en abscisse le temps de fermeture (s), à partir de la pleine ouverture du servomoteur au temps t=0, jusqu'au temps de fermeture complète du servomoteur. Les abscisses sont exprimées en seconde.

Les ordonnées représentent les points de rupture de pente. Elles peuvent être exprimées en millimètres de course du servomoteur, ou bien en représentation normalisées 0-1.

A partir de la loi **LF** programmée, l'instruction remarquable « **Generateur_Loi_fermeture** », automatiquement appelée dans les fichiers .CTX, génère automatiquement les deux vecteurs **xLF** et **yLF** utilisés dans les modules SYSCOP, comme indiqué en ② dans la *Figure 114*.

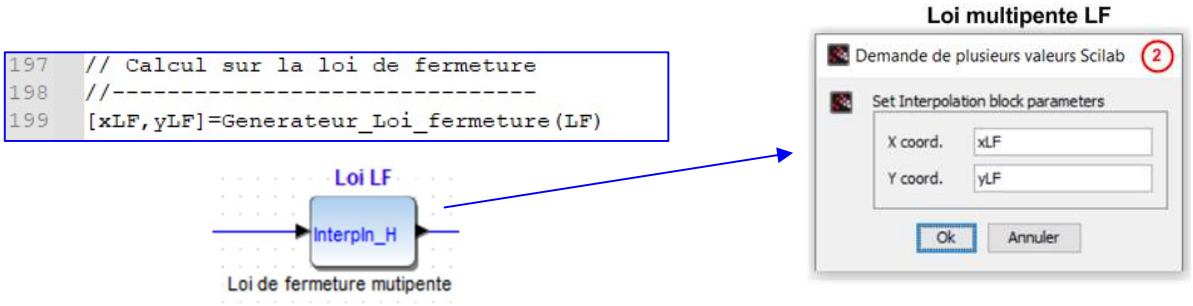


Figure 115 : Calcul des temps de manœuvre à la fermeture sur la loi LF dans les fichiers CTX

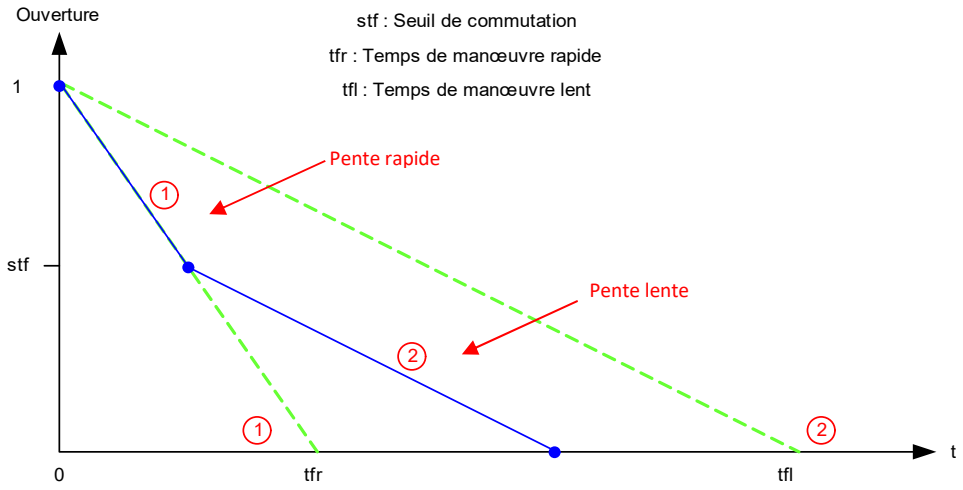


Figure 116 : Principe du paramétrage des lois de fermeture multipente

La loi LF doit être programmée dans le fichier XLS de chaque projet, dans la feuille Excel nommée TM

	A	B	C	D	E	F
1	// Temps de manoeuvre et lois de fermeture multi-pentes positionneur SYSCOP					
2	//----------					
3	tmo=10;	// Temps de manoeuvre en ouverture du servomoteur (s)				
4						
5	// Les lois LF et LFP sont traçables en utilisant l'instruction HYDROTUR "PlotLF"					
6	----------					
7	LF=[					
8	0.0	1.0				
9	3.5	0.3				
10	15.5	0.0				
11	];					
12						

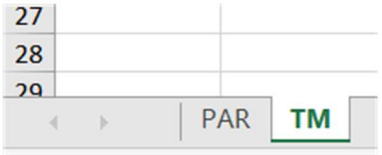


Figure 117 : Loi multi-pentes dans la feuille TM du fichier projet HydroSim\FRANCIS\FR2\Standard\FR2c.xls

D'autre part, l'instruction « **PlotLF** » permet de visualiser la loi de manœuvre LF programmée, ainsi que la loi des temps de manœuvre automatiquement [xLF ; yLF] calculée par HydroSim (*voir aussi Figure 174*)

Un message d'erreur est affiché si la loi n'est pas présente dans le fichier XLS :



Figure 118 : Loi de manœuvre par défaut si la feuille TM est absente

L'exemple ci-dessous illustre l'utilisation de l'instruction PlotLF dans une loi de fermeture à 4 pentes.

Les lois de d'ouverture et de fermeture peuvent également être vérifiées en utilisant le mode manuel MANU=1 dans les modules SYSCOP (*voir Figure 127*)

Une démonstration de la loi de fermeture est réalisée en saisissant dans la console Scilab le commande « **PlotLF demo** » ou « **PlotLF démo** ». (*voir aussi Figure 174*)

```
"LF"

 0.      345.4
 1.      220.
 2.5     212.3
 6.7     163.4
 9.8     83.8
 17.4    0.
```

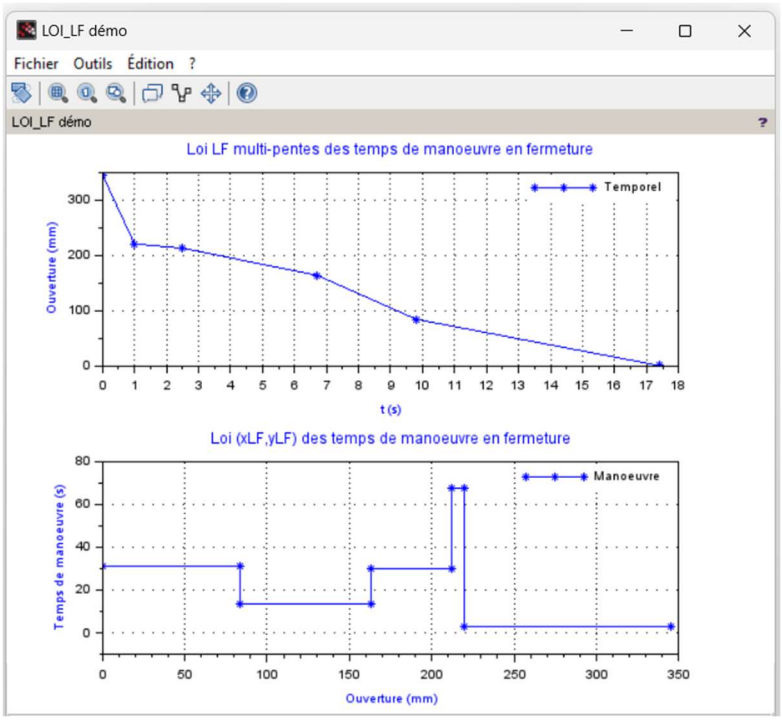


Figure 119 : Exemple de loi de fermeture à plusieurs pentes - Instruction de traçage « **Plot LF demo »**

3.12.5 Seuils de poursuite en grands mouvements du servomoteur

3.12.5.1 Seuils pour Turbines FRANCIS-PELTON

scp	Seuil de poursuite Grand Mouvement sens Ouverture (pu) (FRANCIS-PELTON)	SYSCOP/GM - XLS
scm	Seuil de poursuite Grand Mouvement sens Fermeture (pu) (FRANCIS-PELTON)	SYSCOP/GM - XLS

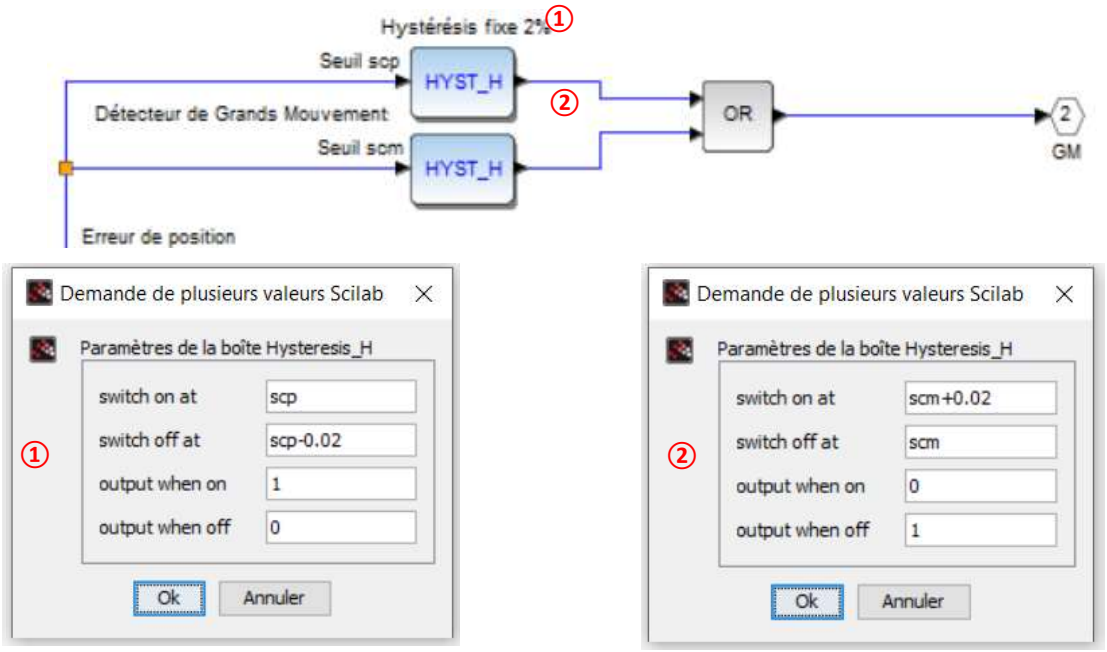


Figure 120 : Détecteur de grands mouvements Vannage ou Injecteurs – Module SYSCOP

Le détecteur de grands mouvements **GM**, sur le vannage d'une turbine Francis ou Kaplan, ou bien sur les injecteurs d'une turbine Pelton, permet d'inhiber l'action intégrale du régulateur de vitesse, dans le but d'éviter toute saturation de ce terme, lors des transitoires en grand mouvements

Une hystérésis fixe de 2% permet d'éviter un déclenchement intempestif des bascules de détection.

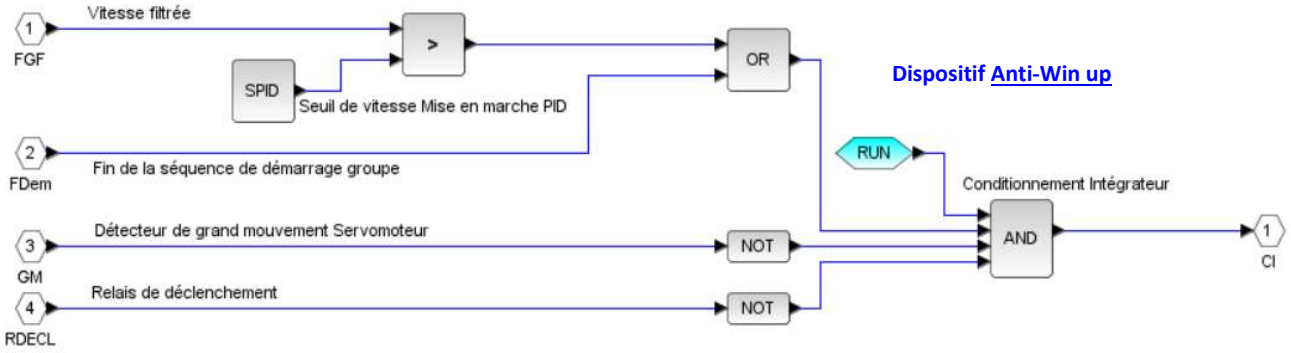
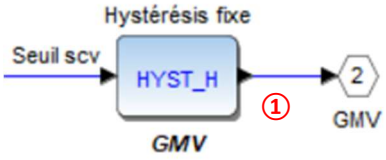


Figure 121 : Bloc de conditionnement de l'intégrateur vitesse dans le module CI-REGN

3.12.5.2 Seuil pour Turbines KAPLAN

scv	Seuil de poursuite Grand Mouvement sens Fermeture (pu) (Vannage KAPLAN)	SYSCOPV/GM - XLS



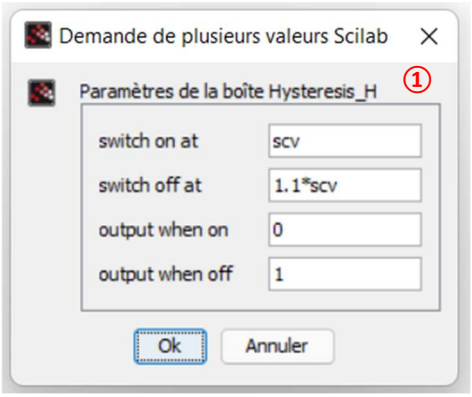


Figure 122 : Seuil grand mouvement du vannage GMV (Turbine Kaplan)

☞ Par défaut, programmer scv=-0.2, sauf indication contraire

3.12.6 Ouverture minimale du servomoteur lors d'un déclenchement du groupe avec retour en marche à vide

PosMini	Ouverture minimale en mode RUN (voir LIN) en cas de délestage du groupe et retour en marche à vide (pu)	LINE -XLS

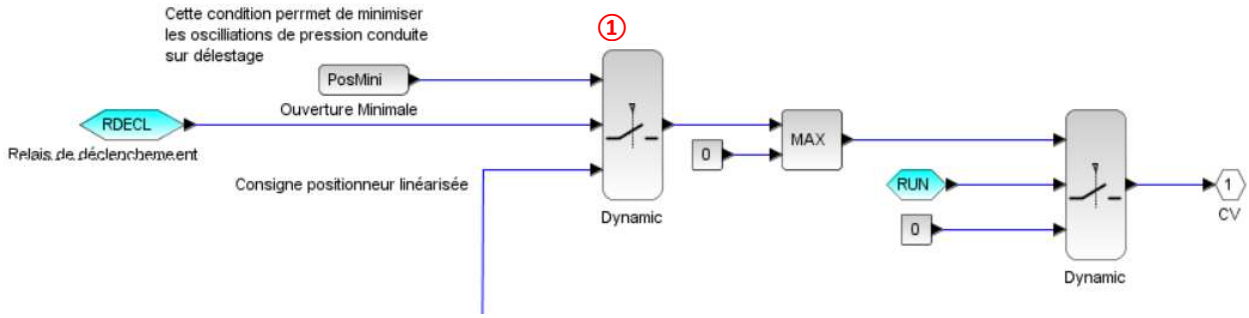


Figure 123 : Prépositionnement du Vannage (ou Injecteur) lors d'un déclenchement du groupe avec Retour en marche à vide (module LINE)

Lorsque le relais de déclenchement **RDECL** est armé (*voir Figure 91*), l'interrupteur ① est en position haute, et impose une consigne de positionnement indiquée par le paramètre **PosMini**.

Ce dispositif permet de minimiser le bélier d'ondes généré dans une séquence de déclenchement avec retour en marche à vide de la machine (*Voir Figure 40, Figure 41, Figure 42*).

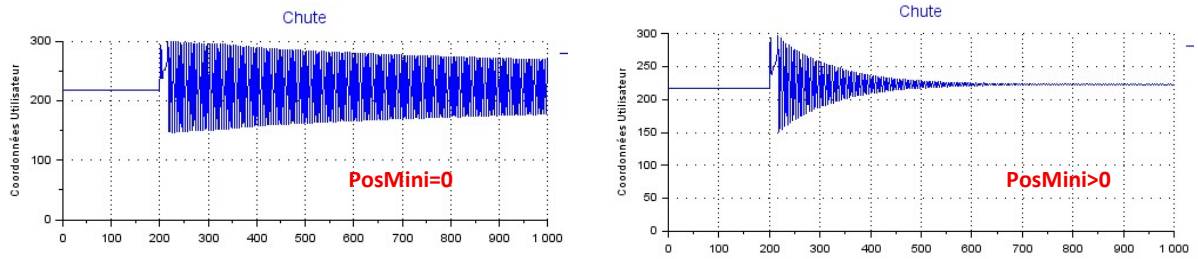


Figure 124 : Amortissement des oscillations conduite avec PosMini

3.12.7 Mode Manuel

MANU	Groupe en mode manuel (su)		SYSCOP - XLS
MANU		**0**	Groupe en mode automatique
		1	Groupe en mode manuel
CManu	Consigne manuelle Vannage ou Injecteurs (pu)		SYSCOP - XLS
EchPos	Échelon de perturbation en mode manuel (pu)		SYSCOP - XLS
tDepManu	Instant de départ de la perturbation (s)		SYSCOP - XLS
tManu	Durée la perturbation en mode manuel (s)		SYSCOP - XLS

Le mode Manuel permet de désolidariser la commande des organes de réglage de la boucle d'asservissement de vitesse.

La commande manuelle est comprise comme un moyen de régler l'asservissement en position de l'ouverture de la turbine, en utilisant la boucle de positionnement dans le régulateur électronique ou directement via le ou les actionneurs [10].

Dans le cadre du simulateur HydroSim, le mode Manuel peut éventuellement être utilisé pour le relevé de toutes les linéarités du système (Puissance/Ouverture, Débit/Ouverture…etc.), afin de linéariser chacune de ces grandeurs fonctionnelles en fonction de l'ouverture du servomoteur.

☞ En mode Manuel, le paramètre **TDJF** (Temps de fermeture du disjoncteur) n'est pas pris en compte, afin d'assurer la cohérence du circuit.

La consigne **CManu** s'applique directement en entrée du positionneur du système copiant, si MANU=1 (*cf. Figure 111 : Bloc de positionnement du servomoteur SYSCOP – Vannage*)

À partir de la consigne de position **CManu**, il est possible de générer, via le composant **STEP2** intégré au module SYSCOP, une perturbation additionnelle d'amplitude **EchPos**, démarrant au temps **tDepManu**, de durée **tManu**.

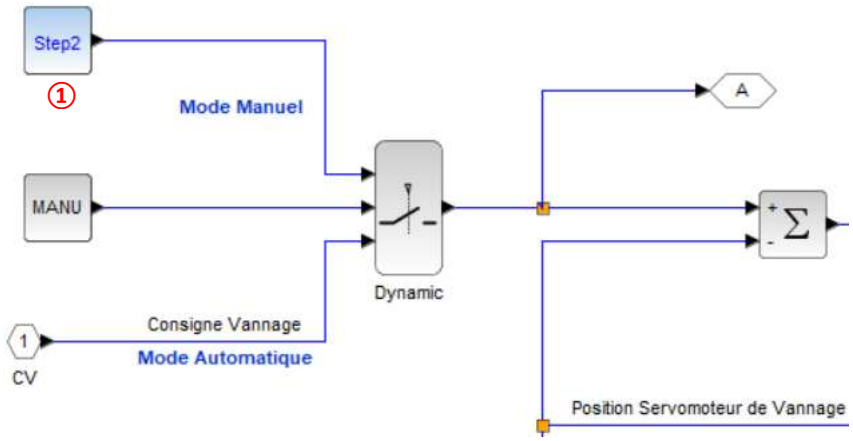


Figure 125 : Mode Manuel dans les blocs SYSCOP (MANU=1)

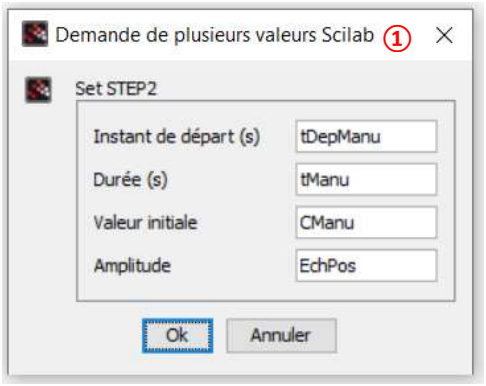
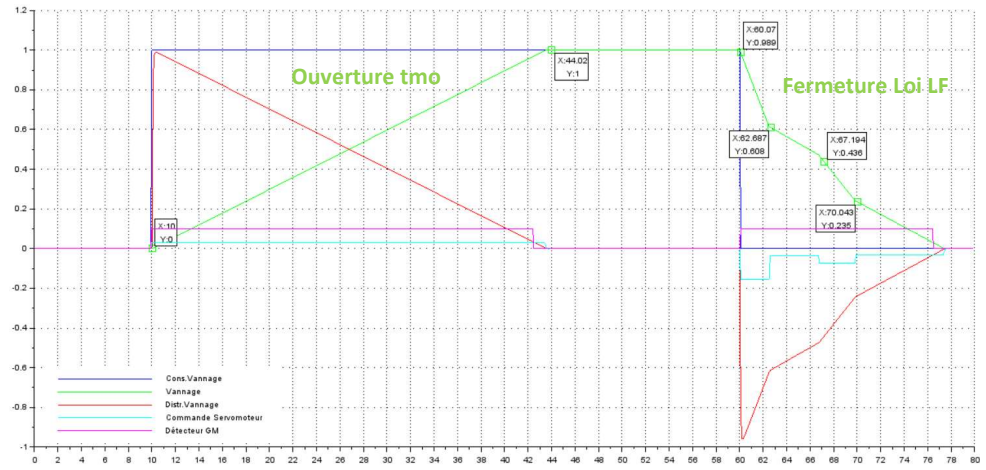


Figure 126 : Paramètres de la boite STEP2 dans un module SYSCOP



Fichier .CFG :

TSim=80; // Durée de la simulation (s)

MANU=1; // Régulateur en mode manuel

CManu=0.0; // Consigne de position en mode manuel

EchPos=1.0; // Echelon de perturbation en mode manuel

tDepManu=10 // Instant de départ de la perturbation

tManu=50; // Durée la perturbation en mode manuel

Figure 127 : Vérification d'une loi de fermeture LF à 4 pentes en mode manuel (MANU=1)

3.13 Système copiant SYSCOPD (Turbines PELTON - Déflecteurs)

3.13.1 Schéma de réglage

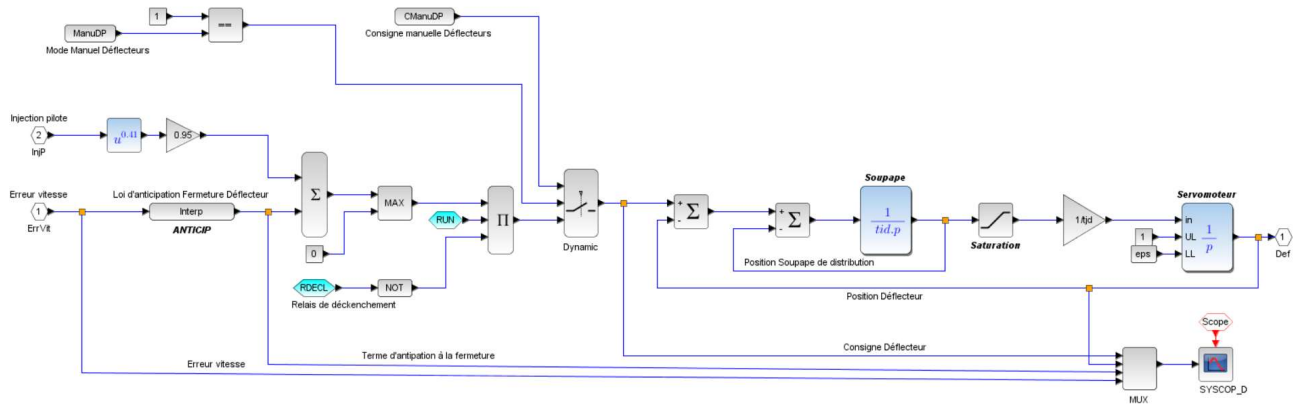


Figure 128 : Système copiant des déflecteurs SYSCOPD

3.13.2 Réglage du PID Positionneur Déflecteur

tjd	Constante de temps de l'intégrateur Servomoteur (s)	SYSCOPD - XLS
tid	Constante de temps de l'intégrateur Soupape (s)	SYSCOPD - XLS

3.13.3 Réglage des temps de manœuvre

tmod	Temps de manœuvre du servomoteur à l'ouverture (s)	SYSCOPD - XLS
tmfd	Temps de manœuvre du servomoteur à la fermeture (s)	SYSCOPD - XLS

Le temps de manœuvre correspond au temps d'ouverture (tmod) ou de fermeture (tmfd) pour une course de 100% du ou des servomoteurs.

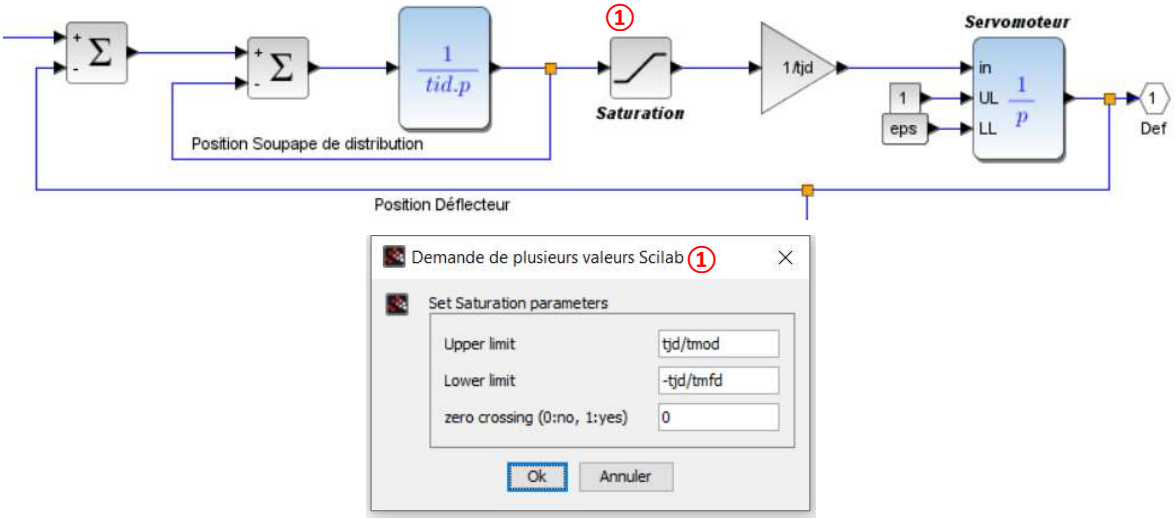


Figure 129 : Action des temps de manœuvre sur les systèmes copiants

3.13.4 Mode manuel Déflecteurs

ManuDP	Déflecteurs en mode manuel (su)	SYSCOPD - XLS
CManuDP	Consigne manuelle Déflecteurs ou Pales (pu)	SYSCOPD - XLS

ManuDP permet de faire fonctionner l'organe de sécurité en mode manuel, le premier organe pouvant rester ou non en mode automatique (*cf. MANU*).

Lorsque ManuDP=1, la consigne de positionnement est indiquée par le paramètre CManuDP, position haute du commutateur ①.

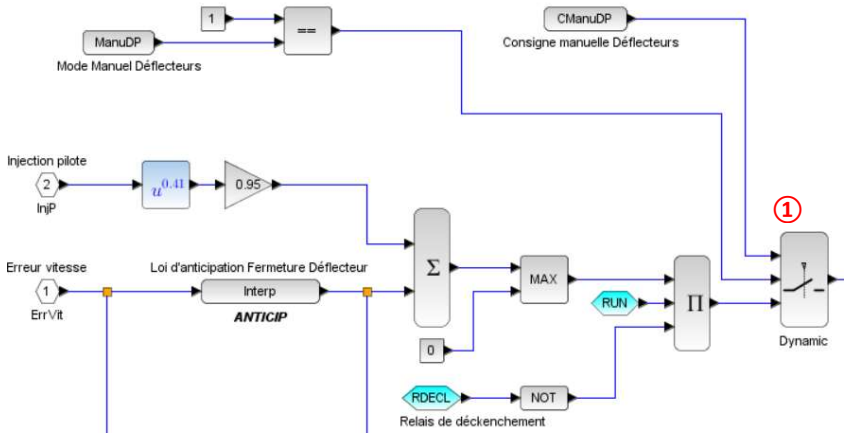


Figure 130 : Mode manuel Déflecteurs dans une turbine PELTON

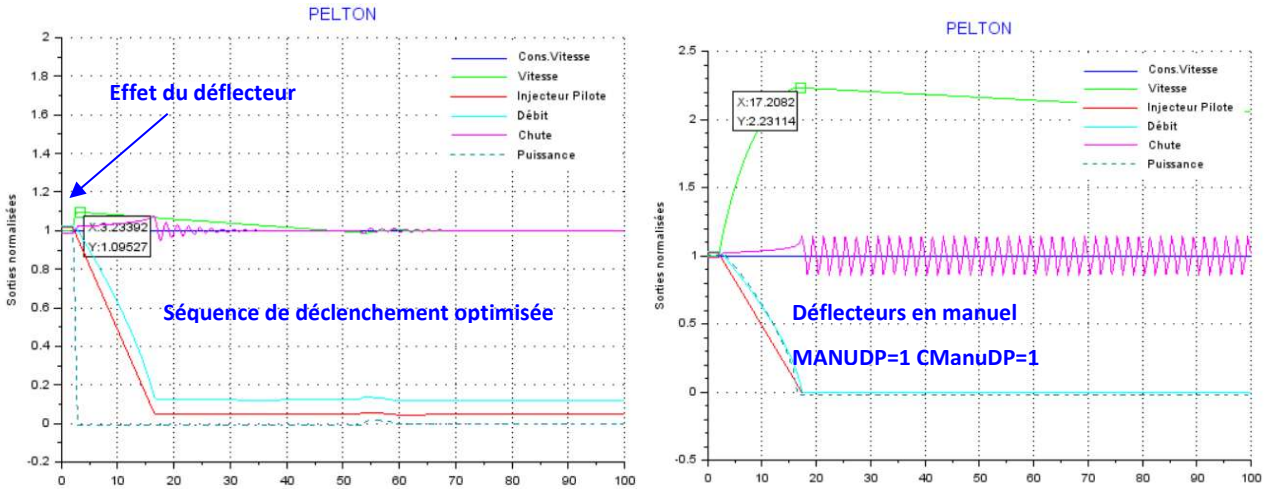


Figure 131 : Effet de coupure des déflecteurs sur une machine PELTON lors d'un déclenchement machine à pleine charge

3.13.5 Loi d'anticipation de fermeture des déflecteurs par anticipation sur l'erreur vitesse

s1a	Seuil d'anticipation n°1 (pu)	SYSCOPD - XLS
s2a	Seuil d'anticipation n°2 (pu)	SYSCOPD - XLS
ga_	Gain sur l'anticipation à la fermeture (su)	SYSCOPD - XLS

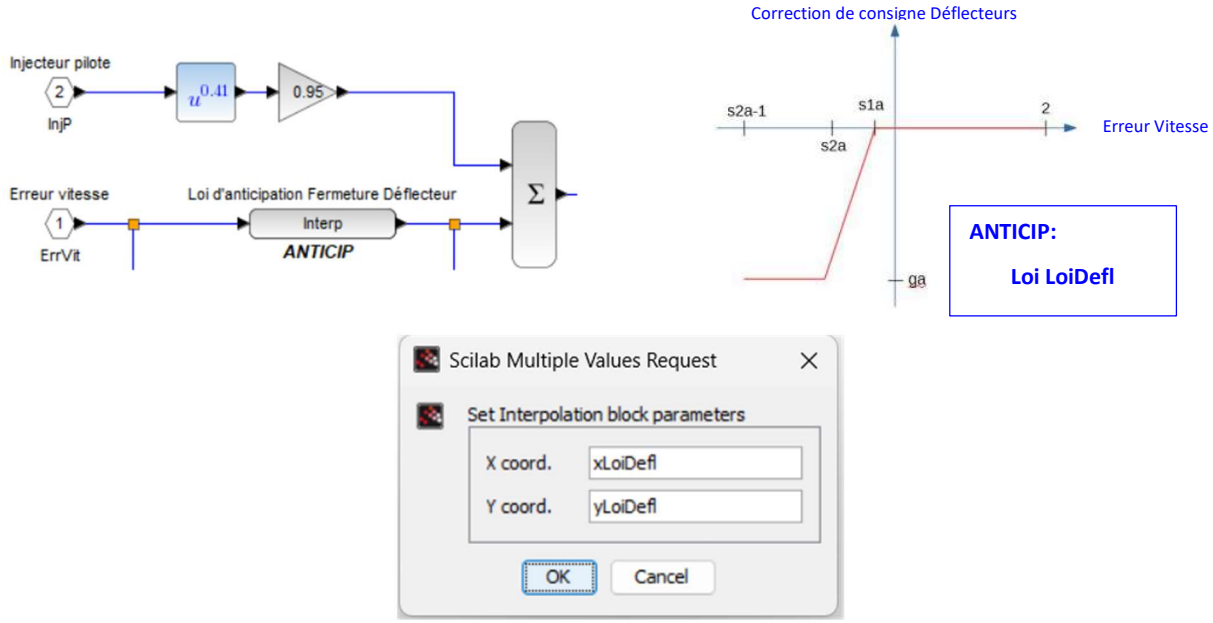


Figure 132 : Loi LoiDefl d'anticipation de fermeture des déflecteurs (Bloc SYSCOPD)

En régime établi, les déflecteurs sont suiveurs de l'injecteur pilote suivant une loi de poursuite empirique, de la forme

$$C_{Def} = 0.95 * C_{Inj}^{0.41}$$

où C_{Def} représente la consigne Déflecteurs et C_{Inj} la consigne d'injection pilote.

Lors d'un délestage de charge sur réseau électrique, ou d'une disjonction de groupe, la machine subit un régime transitoire de survitesse, et pour limiter l'effet de celle-ci, un terme d'anticipation s'appliquant à la consigne des déflecteurs, provoque leurs pénétrations dans le jet des injecteurs, coupant ainsi instantanément le débit d'alimentation dans les augets de la roue. Le jet est ainsi dévié.

La roue Pelton ralentit alors sur son inertie, tant que l'erreur vitesse demeure négative. Ensuite, le déflecteur reprend son rôle de suiveur de l'injection pilote, ce qui permet, le cas échéant une resynchronisation de la machine sur le réseau.

Dans le schéma SYSCOPD, cette loi est écrite sous une forme matricielle xLoiDefl et yLoiDefl, avec

xLoiDefl=[s2a-1. s2a s1a 2.] et yLoiDefl=[ga ga 0. 0.], comme indiqué sur la figure ci-dessus.

Remarque

Programmer par défaut s1a=-0.01 s2a=-0.2 ga=0.5

3.13.6 Loi analytique de suivi de l'injecteur pilote

La loi analytique de suivi de l'injecteur pilote est donnée par la relation $C_{Def} = 0.95 * C_{Inj}^{0.41}$

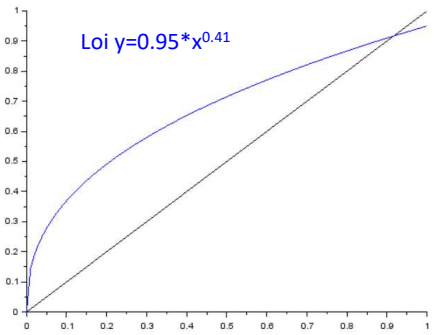


Figure 133 : Loi analytique de suivi du déflecteur

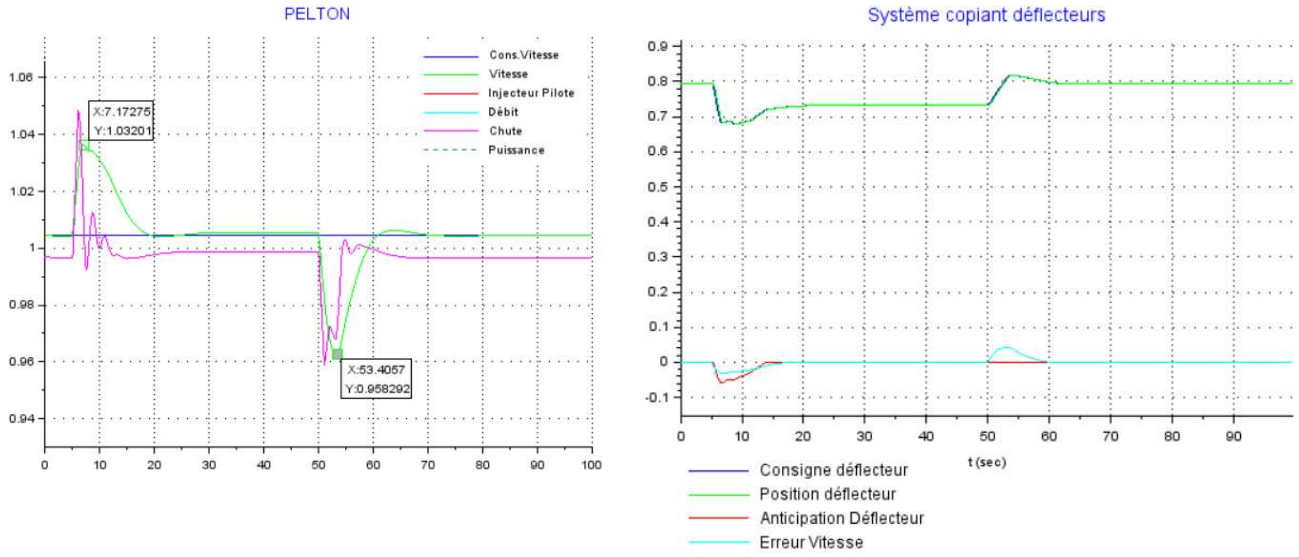


Figure 134 : Échelon 10% à P=75% - Évolution et anticipation du déflecteur PELTON

3.13.7 Correction de Puissance par le Déflecteur - Bloc PU_DEFL

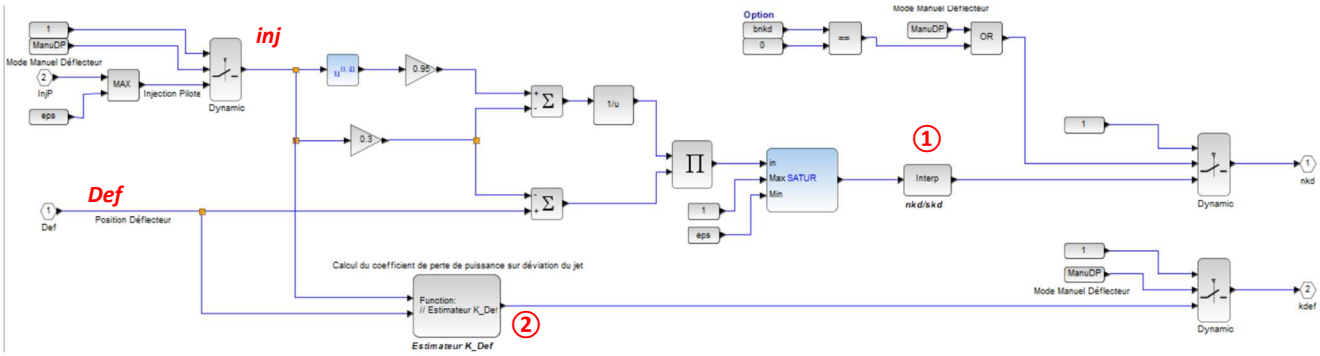


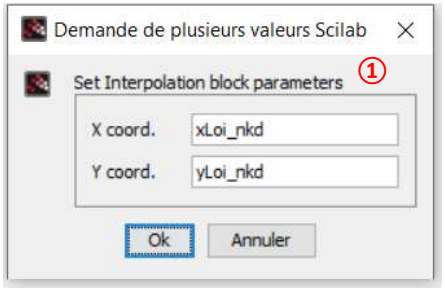
Figure 135 : Correction de Puissance par le Déflecteur - Bloc PU_DEFL

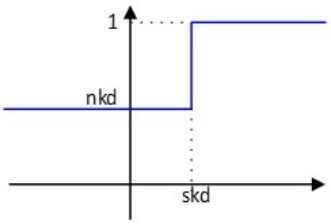
3.13.7.1 Loi de conditionnement de l'intégrateur vitesse par le déflecteur ①

Le principe consiste à dynamiser le PID injecteurs lorsque le déflecteur est dans le jet, pour éviter un traînage important au moment où le système se stabilise et où le déflecteur sort du jet.

Dans les limites d'une étude de stabilité (échelon de charge maxi de 10 %) cette fonction n'est généralement pas sollicitée.

bnkd	Gain sur l'anticipation à la fermeture (su)		PU_DEFL - XLS
bnkd	**0**	Invalidation de l'algorithme de conditionnement Déflecteur	
	1	Validation de l'algorithme de conditionnement Déflecteur	
skd	Seuil sur le coefficient de pénétration du déflecteur dans le jet (pu)		PU_DEFL - XLS
nkd	Facteur de réduction de la constante de temps intégrale injecteurs Ti (su)		PU_DEFL - XLS





xLoi_nkd= [0. skd skd+eps 1.];

yLoi_nkd= [nkd nkd 1. 1.];

Figure 136 : Loi de conditionnement de l'intégrateur vitesse par le déflecteur

☞ Programmer par défaut skd=0.9 et nkd=0.33

Le booléen ***bnkd*** invalide (0) ou valide (1) la fonction de modulation du gain de l'intégrale vitesse en fonction de la position du déflecteur.

Lorsque le dispositif est débrayé (*bnkd=0*), la sortie du bloc de calcul vaut 1, pour ne pas agir sur le conditionnement de l'intégrateur vitesse.

☞ Programmer par défaut bnkd=0, sauf indication contraire.

3.13.7.2 Évaluation du coefficient K_Def de pénétration du déflecteur dans le jet PELTON ②

Le module **PU_DEFL** calcule le coefficient **K_Def**, de participation du déflecteur à la déviation du jet des aiguilles des injecteurs, dans les survitesses liées aux séquences de la machine PELTON. La déviation du jet indique ainsi une perte relative et proportionnelle de la puissance hydraulique, suivant le point de fonctionnement.

Ce calcul est effectué dans la fonction « **Estimateur K_Def** » indiquée en ②.

```
// Estimateur K_Def
//-------------------
Sinj=0       // Seuil de prise en compte de l'action du  Déflecteur

inj=max(u1,0);
if inj<Sinj then inj=0; end;
def=max(u2,0.);

a=0.9*inj^0.41;
b=0.4*inj;

y=0;

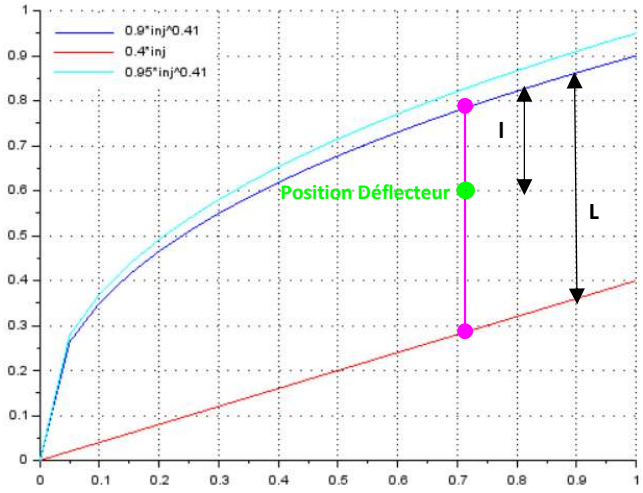
if a<>b then
  y=(def-b)/(a-b);
end

if y>1 then y=1; end

if y<0 then y=0; end

y1=y
```

Figure 137 : Algorithme de l'Estimateur K_Def pour déflecteur - Machines PELTON




```
// Programme Scilab
//-----------------
inj=0:0.05:1;

a=0.9*inj^0.41;     // Courbe 1 – Déflecteur tangent au  Jet
b=0.4*inj;          // Courbe 2 – Déflecteur coupe tout le jet
n=0.95*inj^0.41 ;   // Courbe 3 – Loi de suivi Injecteur Pilote

plot2d(inj,a,2);
plot2d(inj,b,5)
plot2d(inj,n,4)

h=gcf();
axes = h.children;
axes.grid = [1,1];
axes.grid_style = [9,10];

Xlegend=["0.9*inj^0.41";"0.4*inj" ;"0.95*inj^0.41"];
legend(axes(1),Xlegend,2,%f);
```

Figure 138 : Évaluation du coefficient K_Def de pénétration du déflecteur dans le jet PELTON

En dehors de toute perturbation, le déflecteur suit l'injecteur par la loi indiquée en courbe n°3 (*voir §3.13.6*).

- Si la position du déflecteur est en deçà de la courbe n°2, l'expression (def-b) est négative, alors K_Def=0 et le déflecteur coupe totalement le jet
- Si l'expression (def-b)/(a-b) est supérieure ou égale à 1, alors K_Def=1, et le déflecteur ne dévie pas le jet.
- Sinon, le jet est dévié partiellement suivant la relation $K_Def = \frac{l}{L}$

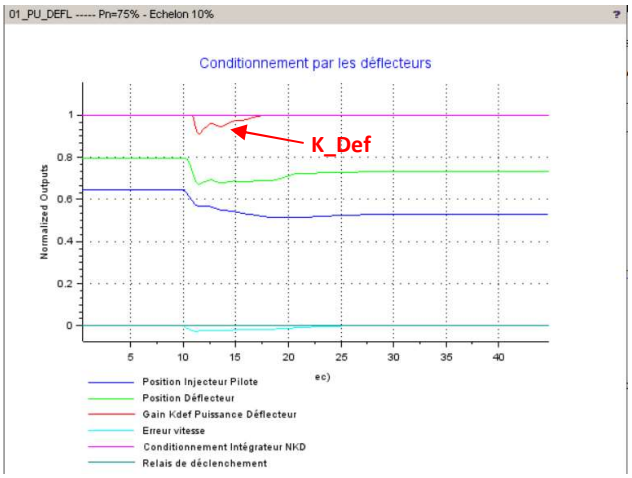


Figure 139 : K_Def - Échelons 10% à Pn=75%

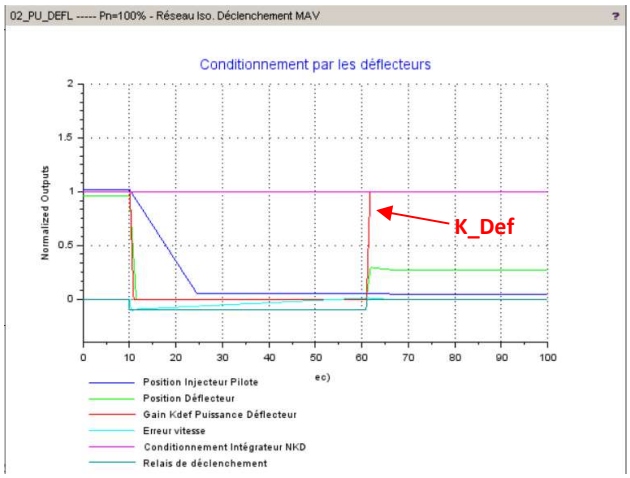


Figure 140 : K_Def Déclenchement avec retour Marche à Vide

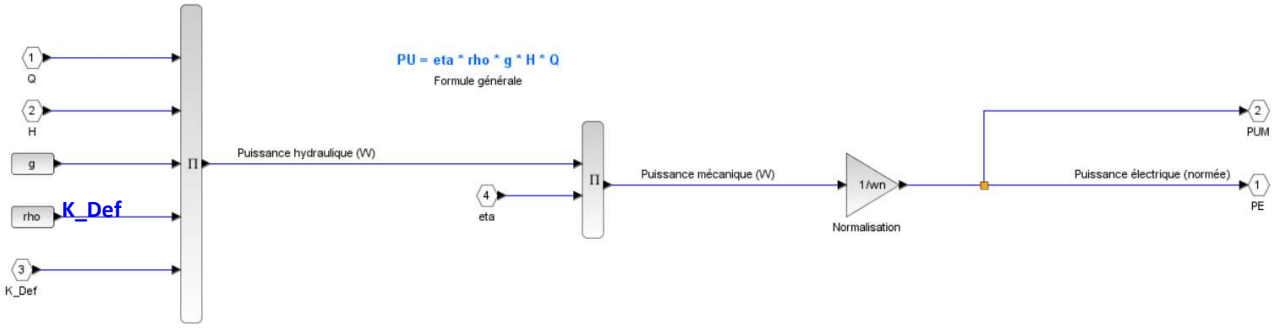


Figure 141 : Module Puissance - Turbines PELTON

3.14 Système copiant SYSCOPP (Turbines KAPLAN - Pales)

3.14.1 Schéma de réglage

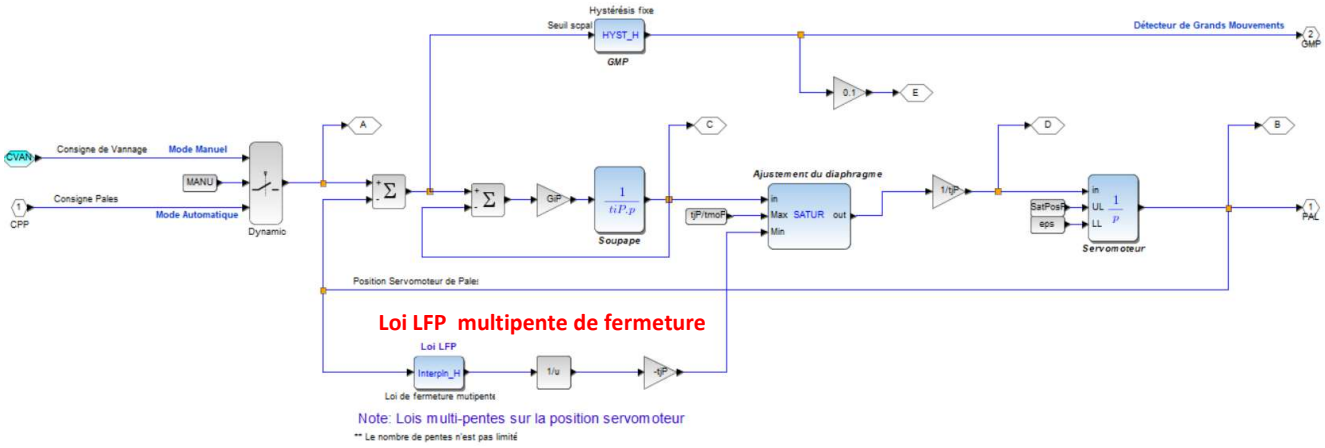


Figure 142 : Système copiant des Pales (bloc SYSCOPP)

3.14.2 Réglage du PID Positionneur Pales

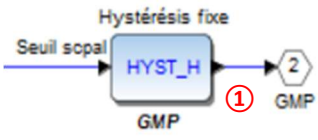
tjP	Constante de temps Intégrale Servomoteur Pales (s)	SYSCOPP - XLS
tiP	Constante de temps Intégrale Soupape Pales (s)	SYSCOPP - XLS
GiP	Gain boucle Soupape Pales (su) (GI=5.0 par défaut)	SYSCOPP - XLS

SatPosP	Maximum saturation of the servomotor excursion Blades (pu)	SYSCOPP - XLS

☞ Les fonctionnements de ces paramètres sont identiques à ceux déjà décrits dans les paragraphes de Réglage de Positionneurs SYSCOP (*voir § 3.12.3 par exemple*)

3.14.3 Seuils de détection de grand mouvement des Pales

scpal	Seuil Grand Mouvement conditionnement Pales (pu)	SYSCOPP/GMP - XLS



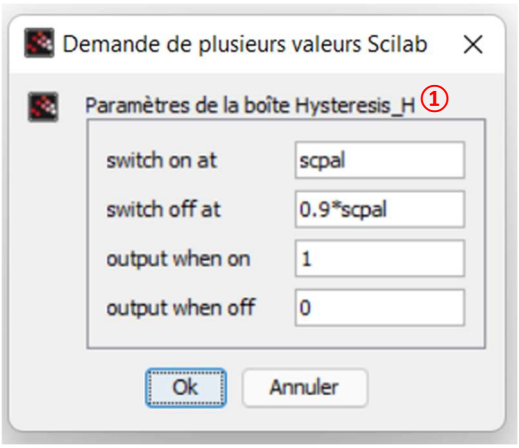


Figure 143 : Détecteur de grand mouvement GMP des pales (bloc SYSCOPP)

☞ Par défaut, programmer scpal=+0.05, sauf indication contraire

3.14.4 Mode manuel des Pales



Figure 144 : Fonctionnement en mode Positionneur des Pales - Module SYSCOPP

Dans la nouvelle version 2.xx, le mode manuel **MANU** conditionne les passages en mode manuel du Vannage **ET** des pales.

Dans ce mode, la consigne manuelle des pales suit la consigne du vannage.

Ce dispositif peut être utilisé pour vérifier les temps de manœuvres et les bascules de détection de grands mouvements des servomoteurs du vannage et des pales.

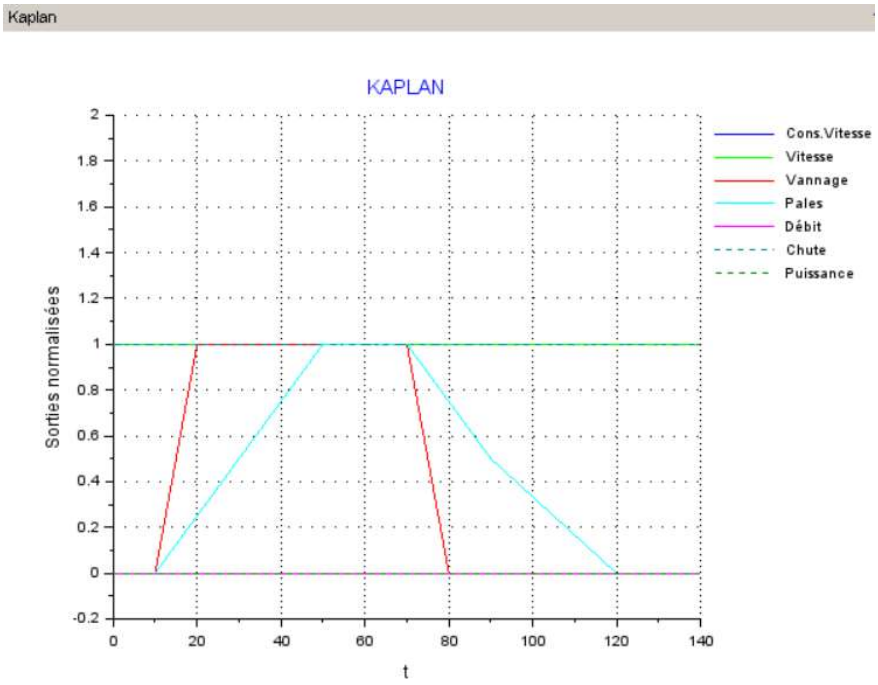


Figure 145 : Vérification des temps de manœuvre du vannage et des pales en mode manuel MANU=1

3.14.5 Réglage des temps de manœuvres Pales

tmoP	Temps de manœuvre en ouverture du servomoteur Pales (s)	SYSCOPP - XLS
LFP_	Loi de fermeture multipente des pales (mm ou pu / s) – Calcul des temps de manœuvre à la fermeture selon la loi LFP	SYSCOPP - XLS

De façon analogue à la loi LF pour le vannage, la loi LFP en fermeture, et le paramètre tmoP en ouverture sont programmables dans la feuille TM du fichier XLS.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	// Temps de manoeuvre et lois de fermeture multi-pentes positionneur PALES SYSCOP								
2	//----------								
3	tmo=10;	// Temps de manoeuvre en ouverture du servomoteur de Vannage (s)							
4	tmoP=40;	// Temps de manoeuvre en ouverture du servomoteur Pales (s)							
5	;								
6	// Les lois LF et LFP sont traçables en utilisant l'instruction HydroSim "PlotLF"								
7	----------								
8	LF=[		// Loi de manoeuvre multipentes de fermeture du Vannage (t en s , ouverture en mm ou normée pu)						
9	0.0	1.0							
10	tmo	0							
11	;								
12	;								
13	LFP=[		// Loi de manoeuvre Pales multipentes de fermeture (t en s , ouverture en mm ou normée pu)						
14	0.0	1.0							
15	20.0	0.5							
16	50.0	0.0					PAR	TM	REND
17	];								
18									

Figure 146 : Programmation des temps de manœuvre des Pales dans le fichier **HydroSim\demos\KAPLAN\KB1\Standard\KB1c.xls**

Les lois peuvent être tracées en saisissant la commande **PlotLF** dans la console Scilab.

☞ **Voir aussi *§ 3.12.4 :* Réglage des temps de manœuvres des organes de réglage en ouverture et en fermeture par une loi LF multipente**

3.14.6 Consignes de Prépositionnement des Pales

3.14.6.1 Schéma RDVS – PREPAL

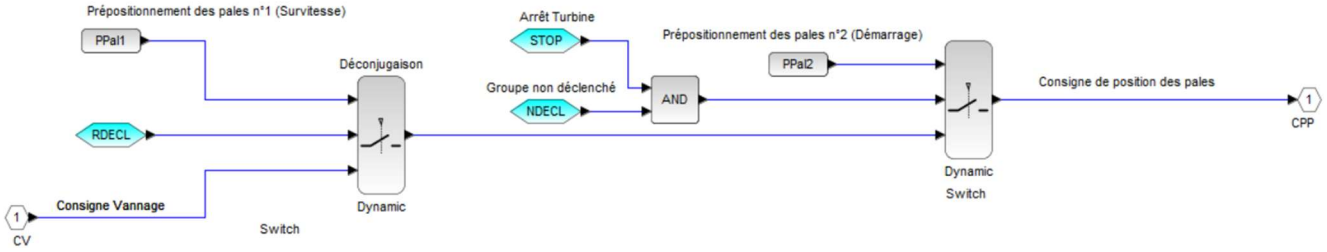


Figure 147 : Pré-positionnements des pales - Module PREPAL

3.14.6.2 Paramétrage PREPAL

PPal1	Prépositionnement des pales n°1 (pu)	PREPAL - XLS
PPal2	Prépositionnement des pales n°2 (Séquence de démarrage) (pu)	PREPAL - XLS

3.14.6.3 Coefficient de déconjugaison des Pales

KDecP	Coefficient de déconjugaison des pales (su)	TurbAdduc KB - XLS

Ce coefficient intervient dans le calcul de la puissance mécanique PMEC du groupe.

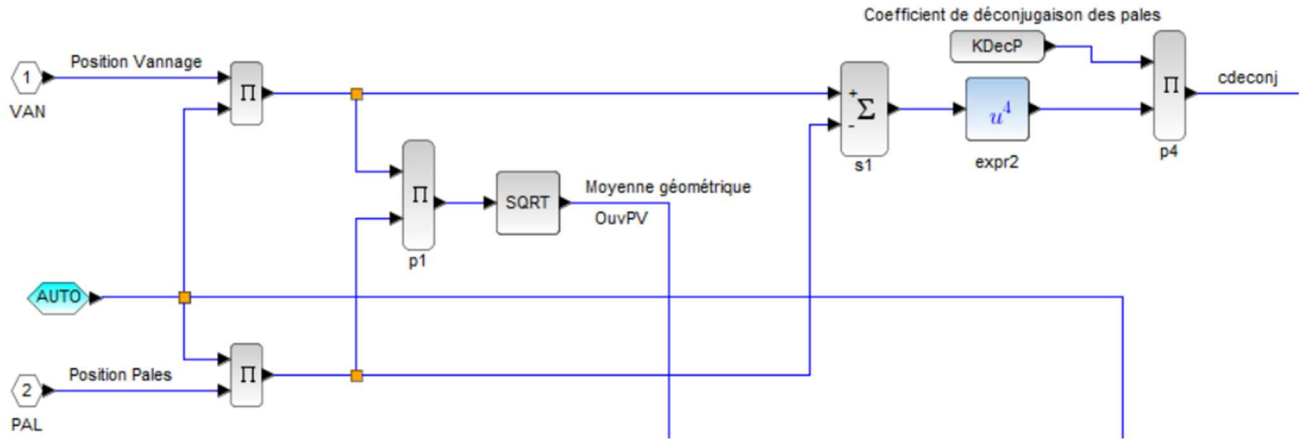


Figure 148 : Coefficient KDecP de déconjugaison des pales

4 LOIS DE LINEARISATION

4.1 Introduction

Afin de réaliser des simulations sans à-coups au lancement du procédé, et garantir des données homogènes dans leurs interprétations, HydroSim intègre une série de lois prises en compte pour garantir les correspondances des grandeurs fonctionnelles manipulées.

Les linéarisations du circuit simulé à mettre en œuvre, peuvent être réalisées de plusieurs façons, afin de préciser les relations entre l'ouverture du vannage, et les valeurs de puissance, débit, rendement, chute, perte de charge, à programmer dans le simulateur.

Ces lois sont listées dans la suite de ce chapitre.

4.1.1 Prise en compte des relations de linéarités expérimentales

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Cote aval (m)	Cote amont (m)	Hb (m)	Hn (m)	CE (Kwh/m3)	Q (m3/s)	Ouv (mm)	Pdc (m)	Puissance (MW)	Rendement (%)
2	267.0	723.0	456.0	444.21	1.0443	73.211	275.00	11.79	275.226	86.25
3	267.0	723.0	456.0	444.74	1.0561	71.539	265.83	11.26	271.987	87.12
4	267.0	723.0	456.0	445.27	1.0681	69.831	256.67	10.73	268.501	88
5	267.0	723.0	456.0	445.81	1.0791	68.048	247.50	10.19	264.346	88.8
6	267.0	723.0	456.0	446.36	1.0888	66.203	238.33	9.64	259.499	89.5
7	267.0	723.0	456.0	446.96	1.0976	64.088	229.17	9.04	253.241	90.1
8	267.0	723.0	456.0	447.72	1.1015	61.362	220.00	8.28	243.32	90.26
9	267.0	723.0	456.0	448.28	1.1043	59.237	210.83	7.72	235.484	90.38
10	267.0	723.0	456.0	448.76	1.1065	57.364	201.67	7.24	228.504	90.46
11	267.0	723.0	456.0	449.44	1.1075	54.616	192.50	6.56	217.749	90.41
12	267.0	723.0	456.0	450.16	1.106	51.514	183.33	5.84	205.101	90.14
13	267.0	723.0	456.0	450.65	1.1039	49.301	174.17	5.35	195.92	89.87
14	267.0	723.0	456.0	451.12	1.1013	47.089	165.00	4.88	186.696	89.57
15	267.0	723.0	456.0	451.72	1.0984	44.124	155.83	4.28	174.483	89.22
16	267.0	723.0	456.0	452.32	1.0917	40.919	146.67	3.68	160.82	88.55
17	267.0	723.0	456.0	452.78	1.0808	38.241	137.50	3.22	148.787	87.57
18	267.0	723.0	456.0	453.18	1.0671	35.787	128.33	2.82	137.479	86.39
19	267.0	723.0	456.0	453.63	1.0493	32.841	119.17	2.37	124.056	84.87
20	267.0	723.0	456.0	454.07	1.0262	29.639	110.00	1.93	109.49	82.91
21	267.0	723.0	456.0	454.16	1.0199	28.883	107.80	1.84	106.044	82.39

Figure 149 : Exemple de relevé de linéarités sur un site hydro-électrique (fichier **HydroSim\demos\FRANCIS\FR2\K2_c\DATA K2.xls**)[PP2.1]

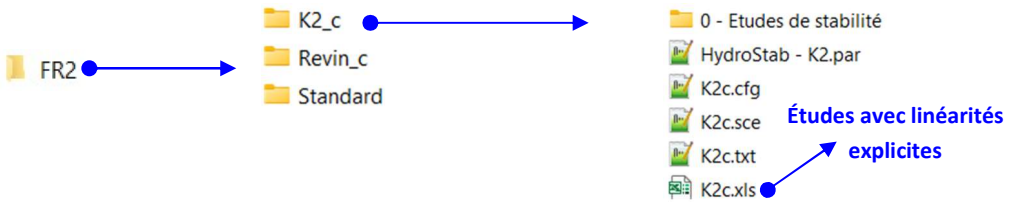
Les données expérimentales doivent alors être introduites par l'opérateur, directement dans le fichier « .XLS » de paramétrisation, dans une feuille nommée **LINE** à créer.

Dans l'étude K2_c, le lecteur consultera le fichier **HydroSim\demos\FRANCIS\FR2\K2_c\K2c.xls.**

	A	B	C	D	E	F
1	// Ouverture en mm	// Débit (m^3/s)	// Puissance (MW)	// Chute nette en m	// Rendement (%)	// Pertes de charge en m
2	O=[	Q=[	P=[	H=[	Rend=[	PDC=[
3	275;	73.211;	275.226;	444.21;	86.2692;	11.79;
4	265.83;	71.539;	271.987;	444.74;	87.1425;	11.26;
5	256.67;	69.831;	268.501;	445.27;	88.0248;	10.73;
6	247.5;	68.048;	264.346;	445.81;	88.8257;	10.19;
7	238.33;	66.203;	259.499;	446.36;	89.5166;	9.64;
8	229.17;	64.088;	253.241;	446.96;	90.1197;	9.04;
9	220;	61.362;	243.32;	447.72;	90.2823;	8.28;
10	210.83;	59.237;	235.484;	448.28;	90.3962;	7.72;
11	201.67;	57.364;	228.504;	448.76;	90.4839;	7.24;
12	192.5;	54.616;	217.749;	449.44;	90.4265;	6.56;
13	183.33;	51.514;	205.101;	450.16;	90.1585;	5.84;
14	174.17;	49.301;	195.92;	450.65;	89.8907;	5.35;
15	165;	47.089;	186.696;	451.12;	89.589;	4.88;
16	155.83;	44.124;	174.483;	451.72;	89.236;	4.28;
17	146.67;	40.919;	160.82;	452.32;	88.5728;	3.68;
18	137.5;	38.241;	148.787;	452.78;	87.595;	3.22;
19	128.33;	35.787;	137.479;	453.18;	86.4115;	2.82;
20	119.17;	32.841;	124.056;	453.63;	84.8849;	2.37;
21	110;	29.639;	109.49;	454.07;	82.9314;	1.93;
22	107.8;	28.883;	106.044;	454.16;	82.4073;	1.84;
23	0;	0;	-0.1*Pnom;	Hnom;	0;	0;
24	]	]	]	]	]	]
25						
26	Interpoler("o=44, p=35");					
27	Interpoler("o=Omav, p=0");					
28						
29						

PAR | TM | LINE

Figure 150 : Saisie des relevés de linéarisation dans le fichier HydroSim\demos\FRANCIS\FR2\K2_c\K2c.xls



Le tableau ci-dessous rappelle les variables [O, Q, P, H, Rend, PDC] utilisées dans HydroSim concernant les lois de conjugaison :

Variable HydroSim	Signification	Unité
xLPO / yLPO	Abscisse / Ordonnée de loi Ouverture / Puissance	Réduite
xLQO / yLQO	Abscisse / Ordonnée de loi Ouverture/ Débit	Réduite
xLHO / yLHO	Abscisse / Ordonnée de loi Ouverture/ Chute	Réduite
xRend / yRend	Abscisse / Ordonnée de loi Ouverture/ Rendement	Réduite
xPdC / yPdC	Abscisse / Ordonnée de loi Ouverture/ Pertes de charge	Réduite
O	Vecteur colonne Ouverture	mm
Q	Vecteur colonne Débit	m^3/s
P	Vecteur colonne Puissance	MW
H	Vecteur colonne Chute	m
Rend	Vecteur colonne Rendement	Réduite
PDC	Vecteur colonne Perte de charge	m

Figure 151 : Variables globales utilisées dans les lois de linéarisation

4.1.2 Simulation analytique et calculs des linéarités

Dans ce cas, bLOQ=0 (*voir paramètre correspondant*)

Le principe intégré dans HydroSim consiste en la réécriture de plusieurs parties des schémas sous forme littérale (TURBADDUC par exemple) et à réitérer une boucle de calcul jusqu'à obtenir un point de convergence garantissant avec finesse, une équivalence entre l'ouverture du servomoteur et la donnée à optimiser.

Le lecteur pourra par exemple suivre la routine *LinePQH_1()*, et ses sous-routines, concernant les circuits FR2 et PELTON.

4.2 Loi de linéarisation Puissance/Ouverture LPO

LPO	Loi de linéarisation Puissance/Ouverture (pu)	LINE - XLS

La loi LPO est présente dans les modules LINE de linéarisation ① ou dans le module de consignation de charge CC ② ; ce bloc est positionné dans la vue générale du circuit simulé. Elle permet d'obtenir une relation d'identité entre la puissance demandée CReseau et la puissance électrique fournie par la machine hydraulique.

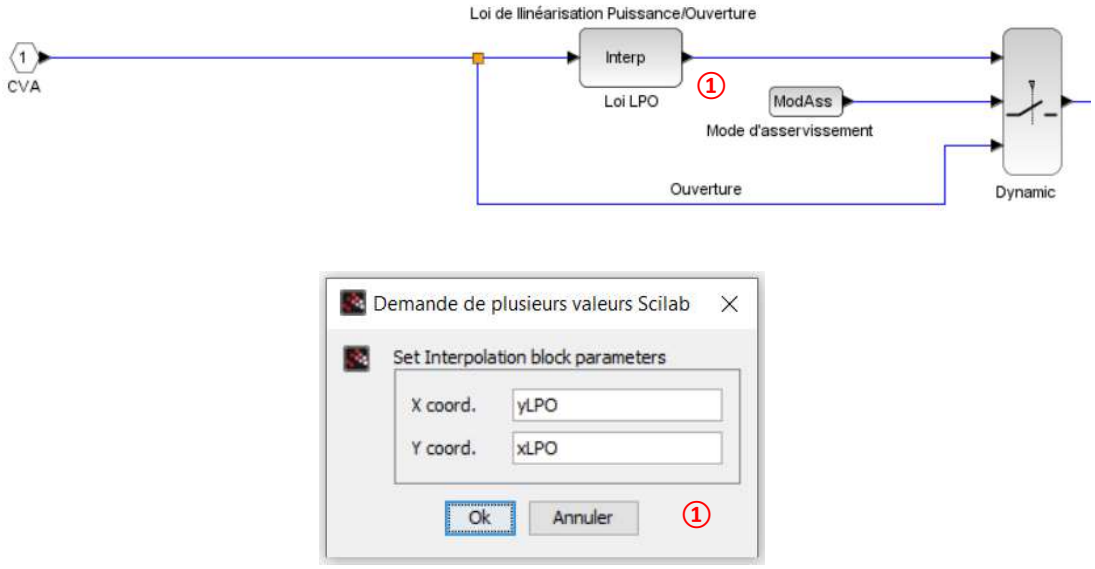


Figure 152 : Loi de linéarisation LPO Puissance/Ouverture dans le circuit FR2 – Module LINE

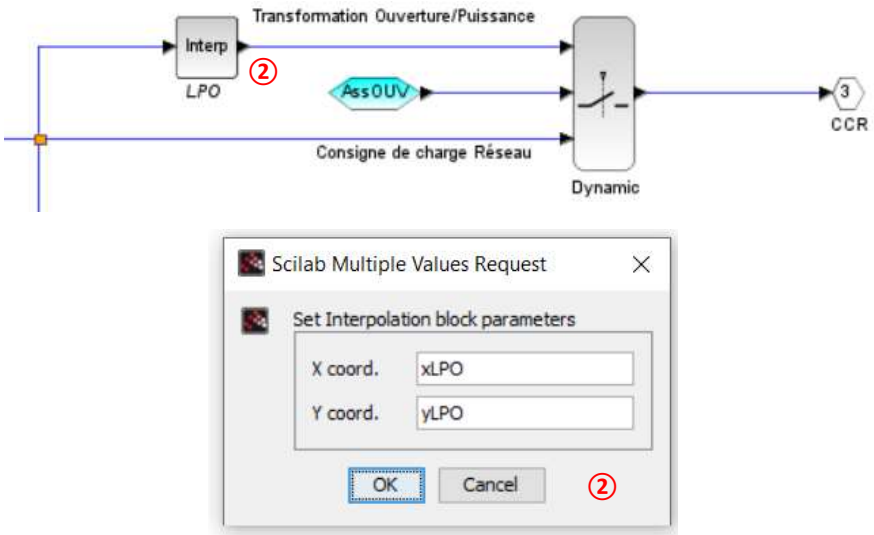


Figure 153 : Loi de linéarisation LPO Puissance/Ouverture dans le circuit FR2 – Consignateur de charge - Module CC

☞ **Noter que les représentations « X coord » et « Y coord » sont croisées dans les modules ① et ②.**

4.3 Loi de linéarisation Débit/Ouverture LQO

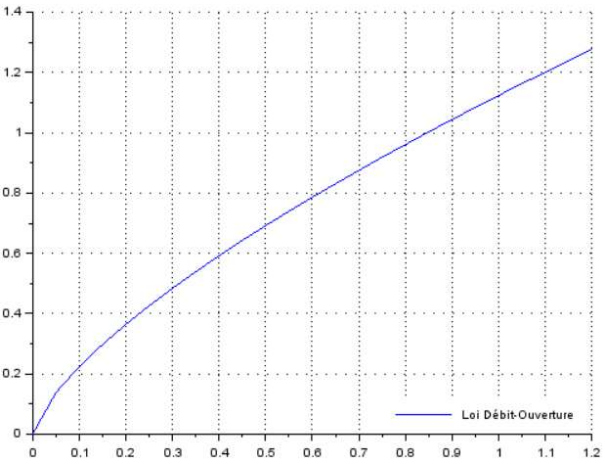
LQO	Loi de linéarisation Débit/Ouverture (pu)	Calculs Préliminaires « .CTX », CC - XLS

La loi **LQO** donne une image de la relation Débit / Ouverture de la machine hydraulique, et permet, suivant les conditions programmées dans la séquence de simulation, de calculer le débit initial **Qini** du groupe hydraulique :

```
42   Qini=interpln([xLQO;yLQO],VAN_0)*Qnom;
```

Figure 154 : Calcul du débit initial Qini dans le fichier FR2.CTX

, où **VAN_0** est la position initiale du vannage, exprimée en coordonnées réduites au lancement de la simulation, et **Qnom** le débit nominal.



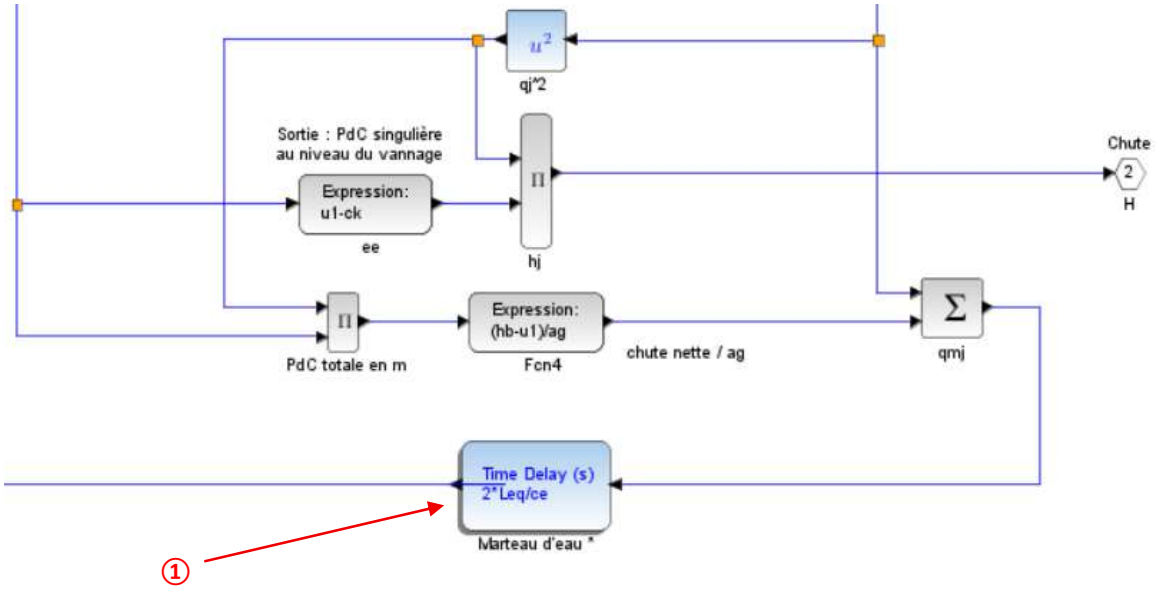

```
// Programme Scilab - Loi LQO
//------------------------------
scf(11) ;
plot2d(xLQO,yLQO,2);

h=gcf();
axes = h.children;
axes.grid = [1,1];
axes.grid_style = [9,10];

Xlegend=["Loi Débit-Ouverture"];

legend(axes(1),Xlegend,4,%f);
```

Figure 155 : Tracé de la loi LQO sous Scilab



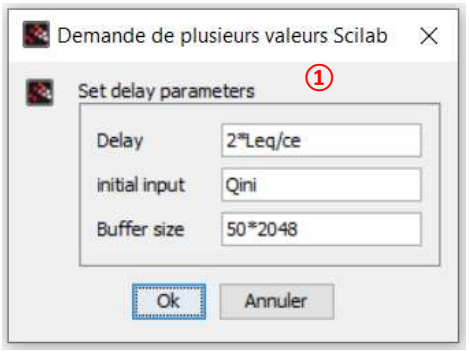


Figure 156 : Utilisation de la variable calculée Qini dans le circuit FR2 Module TurbAdduc

, où **Leq** désigne la longueur équivalente du circuit hydraulique, et **ce** la célérité de l'eau.

bLOQ	Mode d'interpolation de la loi Débit/Ouverture LQO	TurbAdduc - XLS
Display_LINE	Affichage des lois de linéarisation recalculées (1) ou non (0) (pour récupération sous Excel)	TurbAdduc - XLS

- Si **bLOQ=0** :

  Le débit est simulé par une loi analytique et hypothétique $Q = O^{nq}$, où $nq = 0.7$.

- Si **bLOQ=1** :

  Le débit est calculé à partir d'une loi de linéarisation expérimentale Q=f(O), obtenue à partir des relevés des linéarités mesurées expérimentalement sur le site de production, et fournies dans un fichier Excel.

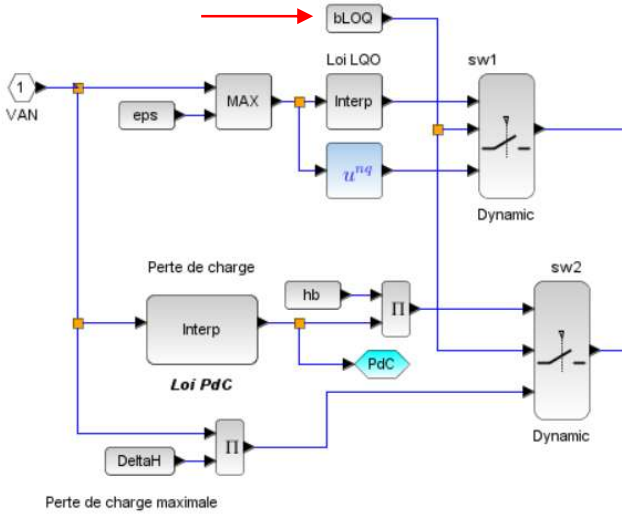


Figure 157 : Actions de l'interrupteur bLOQ dans le module TurbAdduc de FR2

Le paramètre Display_LINE, permet de tracer l'ensemble des lois au lancement de la simulation.

```
Débit réduit yLQO
    0.
    0.1241885
    0.2017425
    0.2679485
    0.3277119
    0.3830949
    0.4352141
    0.4847607
    0.5322002
    0.5778646
```

…etc

Affichage numérique de l'ensemble des lois dans la console Scilab.

Possibilité de récupérer les données par un Copier/Coller pour recopie dans un tableau Excel

Figure 158 : Affichage des lois dans la console Scilab si Display_LINE=1

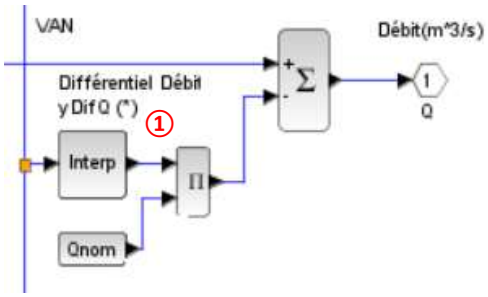
☞ **Programmer bLQO=0 par défaut, sauf études particulières**

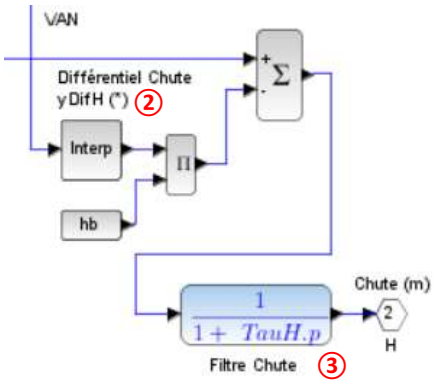
☞ **Programmer Display_LINE=0 par défaut**

4.4 Lois différentielles en Débit et Chute DifQ-DifH

DifQ	Différentiel entre Débit modèle et Débit expérimental	TurbAdduc
DifH	Différentiel entre Chute modèle et Chute expérimentale	TurbAdduc
TauH	Constante de temps du filtre passe-bas du signe de chute (s)	TurbAdduc

Ces deux lois sont présentes dans le composant TurbAdduc (FR2, PELTON).





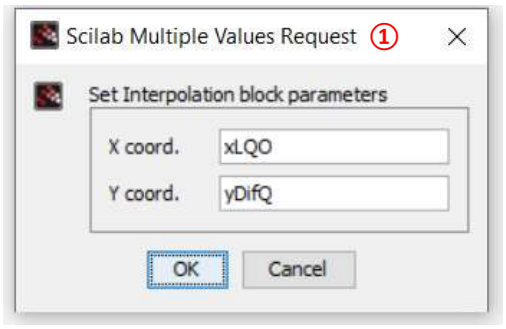


Figure 159 : Circuit différentiel en Débit

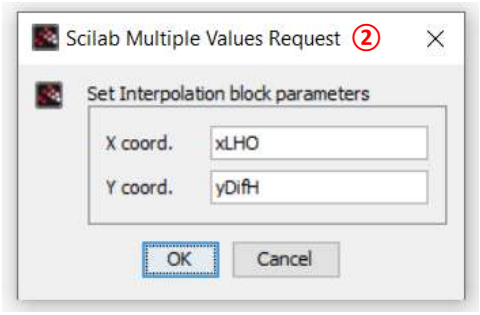


Figure 160 : Circuit différentiel en Chute



Figure 161 : Initialisation du filtre Chute

La valeur **Hini** d'initialisation du filtre Chute, exprimée en m, est calculée automatiquement dans le fichier CTX, en fonction de la position initiale du vannage :

```
//-----------------------------
// Calcul de la chute initiale
//-----------------------------
Hini=interpln([xLHO;yLHO],VAN_0)*hb
```

4.5 Loi de linéarisation Débit/Puissance LQP

LQP	Loi de linéarisation Débit/Puissance (pu)	Calculs Préliminaires « .CTX », CC

☞ Lorsque l'on souhaite réaliser un asservissement de débit (module **CC**), et étant donné la présence de la loi LINE de linéarisation Puissance/Ouverture de la machine, il est nécessaire de transformer linéairement la consigne de débit en consigne de puissance.

Cet artifice est réalisé par la loi **LQP** permettant cette opération. Elle se déduit des lois **LPO** et **LQO**, et prend en compte en abscisses les données **yLPO** de la loi **LPO**, et en ordonnées les données **yLQO** de la loi Puissance/Ouverture **LQO.**

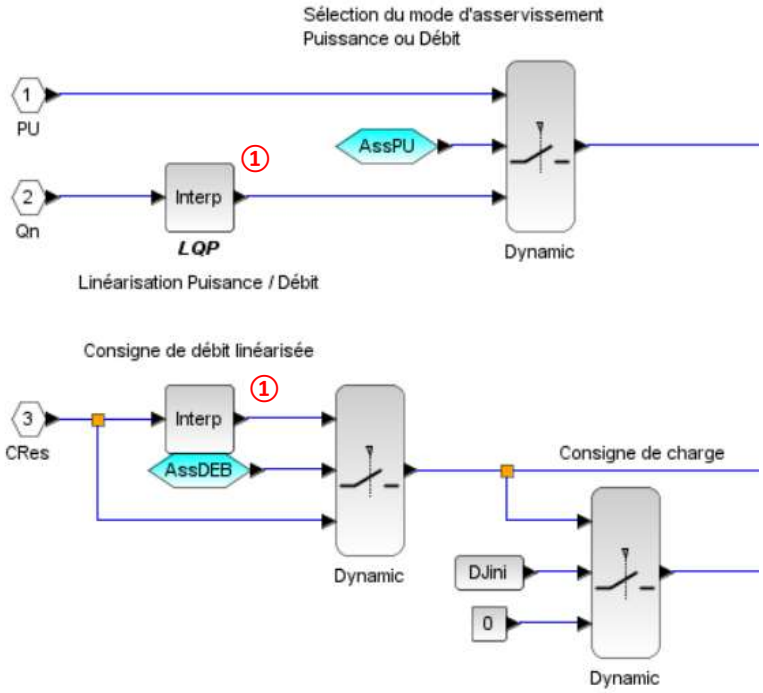


Figure 162 : Asservissement de débit dans le module CC

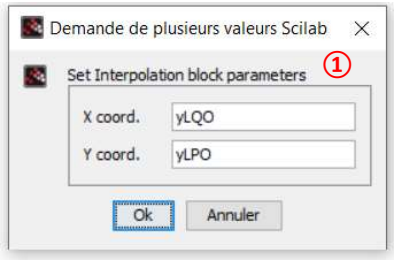
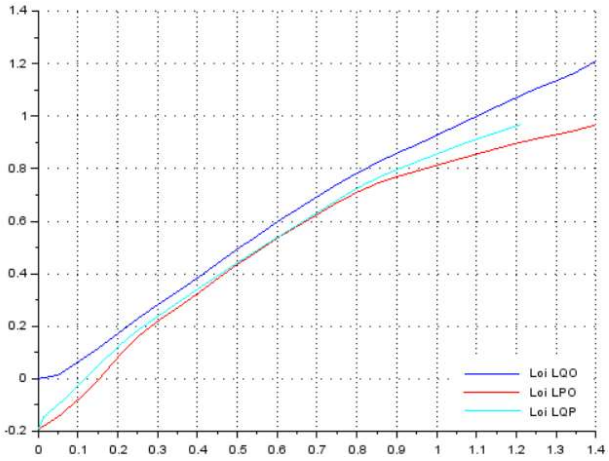


Figure 163 : Loi LQP - Module CC




```
// Programme Scilab - Loi LQP
//----------------------------
scf(12);
plot2d(xLQO,yLQO,2);      // Loi LQO
plot2d(xLPO,yLPO,5);      // Loi LPO
plot2d(yLQO,yLPO,4);      // Loi LQP

h=gcf();
axes = h.children;
axes.grid = [1,1];
axes.grid_style = [9,10];

Xlegend=["Loi LQO", "Loi LPO" , "Loi LQP"];

legend(axes(1),Xlegend,4,%f);
```

Figure 164 : Tracé de la loi LQP sous Scilab

4.6 Loi de linéarisation Chute/Ouverture LHO

LHO	Loi de linéarisation Chute/Ouverture (pu)	Calculs Préliminaires « .CTX », « .XLS »

La loi Chute/Ouverture est utilisée dans les circuits avec collines Machine, type **FR5** par exemple.

Elle permet de calculer la chute initiale **H0** utilisée au lancement de la simulation :

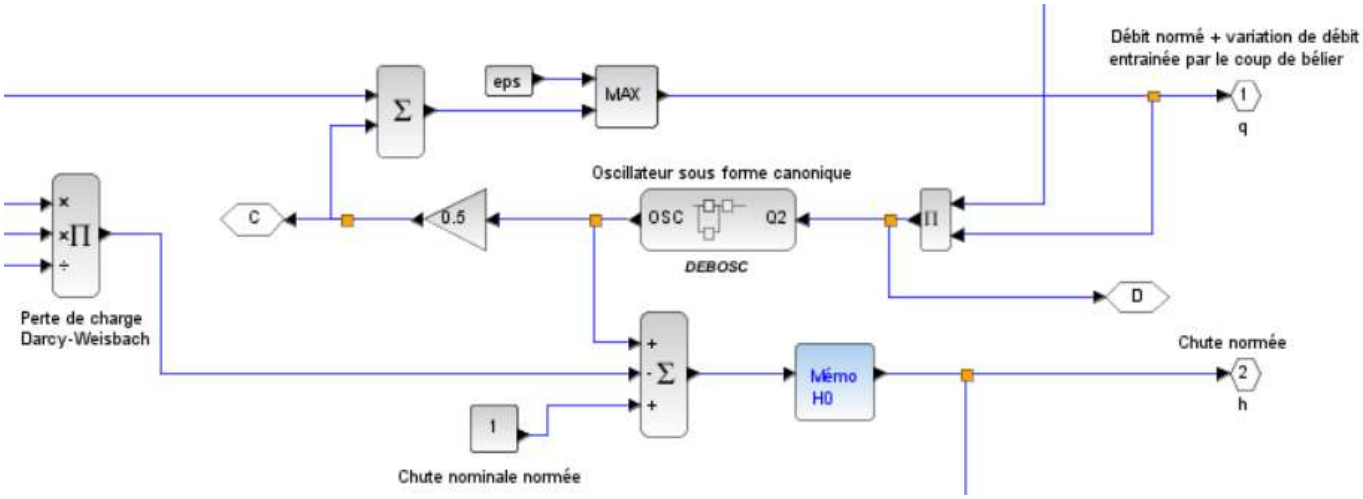
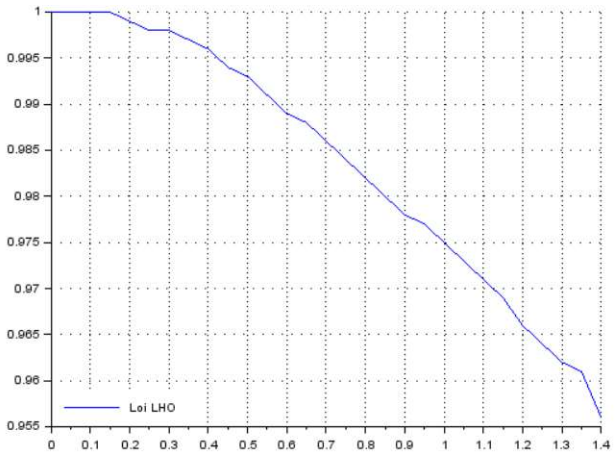


Figure 165 : Calcul de la chute initiale **H0** dans le module Marteau d'eau/TurbAdduc du circuit **FR5**

```
120  // Calcul de la chute initiale
121  //----------------------------
122  H0=interpln([xLHO;yLHO],VAN_0)
```

Figure 166 : Calcul de la chute initiale **H0** dans le fichier **FR5.CTX**




```
// Programme Scilab - Loi LHO
//-----------------------------
scf(15);
plot2d(xLHO,yLHO,2);          // Loi LHO


h=gcf();
axes = h.children;
axes.grid = [1,1];
axes.grid_style = [9,10];

Xlegend=["Loi LHO"];
legend(axes(1),Xlegend,3,%f);
```

Figure 167 : Tracé de la loi LHO sous Scilab

4.7 Pertes de charge – Loi PdC

DeltaH **Loi PdC**	Perte de charge maximale estimée (mce) (si donnée disponible) Loi de linéarité de pertes de charge en fonction du l'ouverture	Contexte

DeltaH désigne la perte de charge maximale, utilisée dans le circuit d'adduction de la turbine TURBADDUC, et calculée dans le fichier CTX.

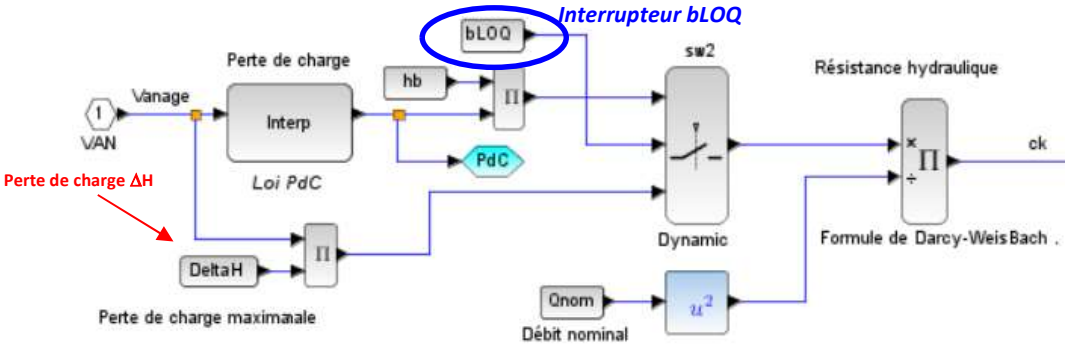


Figure 168 : Évaluation des pertes de charge dynamiques dans le circuit TURBADDUC du modèle FR2

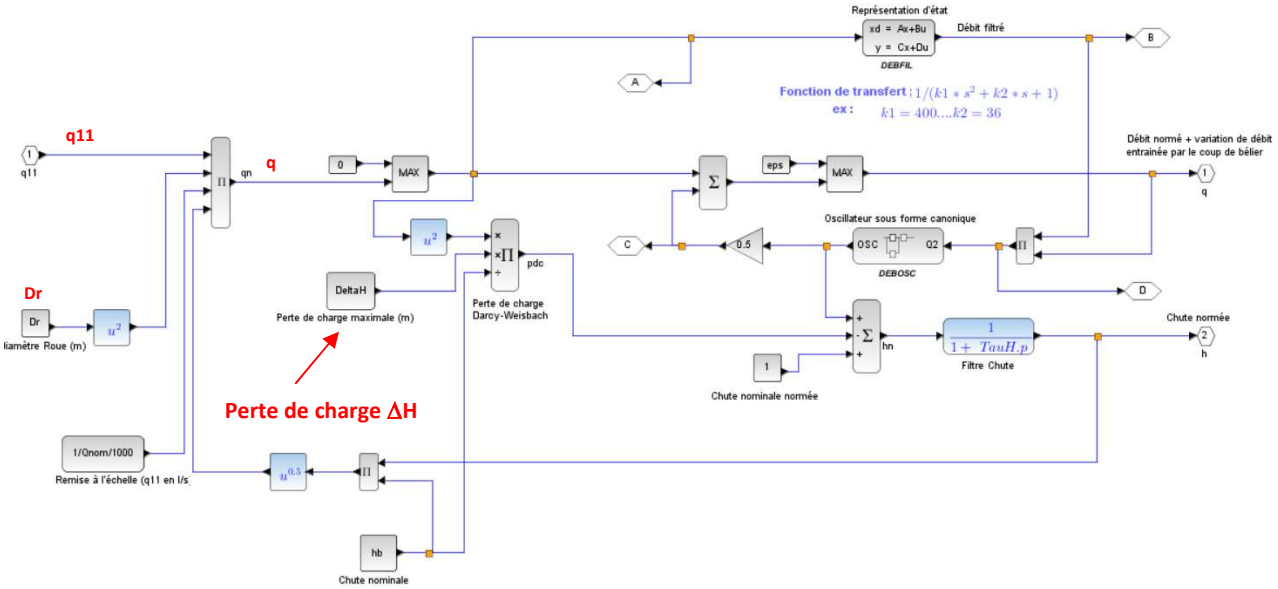


Figure 169 : Évaluation des pertes de charge dynamiques dans le circuit TURBADDUC-Marteau d'eau du modèle FR5

Deux cas de figure sont prévus, en fonction du paramètre programmable de sélection bBLOQ.

1. **Si bLOQ=1**, l'opérateur a préalablement renseigné dans la programmation du modèle, dans les fichiers .XLS, les linéarités relevées sur le site pour différentes chutes obtenus en fonction des points de fonctionnement à l'ouverture.

   ☞ ***Le lecteur consultera le chapitre 4.1.1 pour connaitre la méthode d'incorporation de ces données***

   La loi **Perte de charge PdC** permet alors de calculer par interpolation linéaire la valeur dynamique de la perte de charge, en fonction de l'ouverture VAN du vannage.

2. **Si bLOQ=0,** la perte de charge maximale ΔH est évaluée à partir de la **Formule de Darcy-Weisbach** :

$$\Delta H = f_D \cdot \frac{L_{eq}}{D_h} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

,où ΔH Perte de charge (m), f_D coefficient de perte de charge de Darcy, L_{eq} Longueur équivalente de la conduite (m), D_h diamètre hydraulique de la conduite (m), V vitesse moyenne du fluide (m.s^{-1}), g accélération de la pesanteur (m.s^{-2})

Ensuite, le simulateur calcule la résistance hydraulique **ck** du procédé par $ck = \frac{\Delta H}{Q^2}$, où Q est le débit nominal (m^3/s)

Ce paramètre **ck** est utilisé dans la simulation de la partie Turbine+Adduction TURBADDUC.

```
// Calcul du nombre de Reynolds
//-----------------------------
V=Qnom/Seq;                                          // Vélocité moyenne de l'eau
Re=V*rho*Dh/mu

// Calcul du coefficient de frottement de Darcy avec la corrélation de Colebrook-White
//-------------------------------------------------------------------------------------
fd=fsolve(0.01,Colebrook);                           // Appels récursifs à la fonction Colebrook

// Calcul de la perte de charge à 100% d'ouverture
//------------------------------------------------

if bLOQ then
        DeltaH=interpln([xPdC;yPdC],1.)*hb;          // Perte de charge en mètres, calculée à 100% d'ouverture
else
        DeltaH=(fd*Leq*V^2)/(Dh*2*g);                // Perte de charge en mètres - Formule classique de Darcy-WeisBach
end

// Calcul de la résistance hydraulique (équation de Darcy-Weisbach)
//-----------------------------------------------------------------
ck_nom=DeltaH/(Qnom^2);                              // Résistance hydraulique de la conduite
```

Figure 170 : Calcul du coefficient de perte de charge dans le contexte FR2.CTX du circuit FR2

Le coefficient f_D est préalablement calculé à partir de la fonction standard ***fsolve*** de Scilab, et utilise la fonction Colebrook.sci, fournie dans la suite HydroSim, et disponible dans le répertoire HydroSim\macros\ Colebrook.sci

Cette fonction évalue le coefficient de perte de charge à partir de la **Formule de Colebrook-White** :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2log(\frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,7D})$$

Figure 171 : Formule de ColeBrook-White - Évaluation du coefficient de perte de charge

avec $\lambda = f_d$, $k = rugo$, et $D = D_h$, Re Nombre de Reynolds calculé.

```
function result=Colebrook(x)

        result=1/sqrt(x)+2*log10(2.51/(sqrt(x)*Re)+rugo/(3.7*Dh))

        //result=1/sqrt(x)+2*log10(2.51/(sqrt(x)*Re)+rugo/Dh)          // Ancienne formule

endfunction
```

Figure 172 : Calcul du coefficient de frottement de Darcy dans la fonction dans la routine « **Colebrook.sci** »

La fonction ***fsolve***[7] de Scilab fait tendre le résultat « result » vers 0 à partir de la valeur fd=0.01, donc vers l'égalité indiquée en *Figure 171*, où fd=x.

En rajoutant une ligne de traçage « mprintf("fd=%f resul=%f\n",x,result) » dans la fonction ci-dessus, on obtient par exemple la trace :

[7] fsolve résoud ici le système d'équations non linéaires [f(λ)-g(λ)=0]. Saisir dans la console Scilab « doc fsolve » pour plus d'informations sur cette fonction.

```
fd=0.010000000000 resul=-1.570684379166
fd=0.010000000149 resul=-1.570684453675
fd=0.006858799374 resul=0.504115542416
fd=0.007622019018 resul=-0.116400654319
fd=0.007478849079 resul=-0.007278833516
fd=0.007469299109 resul=0.000111418977
fd=0.007469443089 resul=-0.000000105218
fd=0.007469442953 resul=-0.000000000002
fd=0.007469442953 resul=0.000000000000
```

Figure 173 : Traçage de l'instruction de Colebrook-White

☞ **Voir aussi la suite MECAFLUX de logiciels experts en Mécanique des fluides**[8] Mecaflux Standard

https://www.mecaflux.com/suite/boutique.php

https://www.mecaflux.com/didacticiels_et_tutoriaux.htm

☞ Le lecteur consultera aussi le site pour plus d'informations sur les calculs réalisés :

https://hydroturbine.info/formules-et-calculs/pertes-de-charge/pertes-de-charge-lineaires/

[8] Coût environ 60€ - Suite logicielle Hydraulique, de très grande qualité experte.

4.8 Tracé des lois de linéarisation dans la console Scilab – Instructions HydroSim

4.8.1 Présentation

Des nouvelles instructions ont été développées pour visualiser les courbes de linéarisation saisies.

Ces instructions sont à saisir dans la console Scilab, après un premier chargement des lois (ou bien le premier lancement d'une simulation avec un fichier .SCE).

Les codes source de ces fonctions sont disponibles dans le fichier ***HydroSim\macros\Plot.sci***, fichier chargé automatiquement au lancement de Scilab.

L'instruction HydroSim réservée « **Plot** », saisie dans la console Scilab, résume l'ensemble des traceurs mis à disposition :

```
--> Plot
-------------------------------------------------------------------------------
Aide en ligne :

        Fonctions de traçage des lois de linéarisation HYDROTUR

        Un fichier de paramétrage doit être préalablement chargé avant utilisation

        Entrez une commande dans la console Scilab:
        ---------------------------------------------------------------------
         PlotP           : Courbe Puissance/Ouverture
         PlotQ           : Courbe Débit/Ouverture
         PlotPQ          : Courbe Débit/Puissance
         PlotQP          : Courbe Puissance/Débit
         PlotH           : Courbe Chute/Ouverture
         PlotRend        : Loi de rendement
         PlotPDC         : Loi de perte de charge
         PlotDifH        : Différentiel de chute
         PlotDifQ        : Différentiel de débit
         PlotLINE        : Ensemble des lois de linéarisation
         PlotLF          : Loi multi-pentes des temps de manoeuvre en fermeture
         PlotLF demo     : Loi multi-pentes des temps de manoeuvre en fermeture
         PlotHill        : Colline machine
         PlotHill demo   : Colline machine
         PlotAll         : Toutes lois
-------------------------------------------------------------------------------
```

Figure 174 : Instructions "Plot" dans la console Scilab

4.8.2 Exemples de tracé de loi

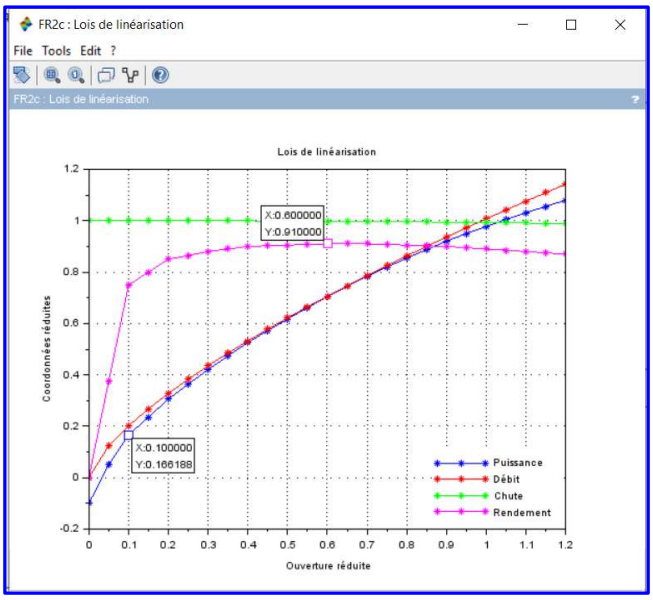


Figure 175 : Exemple de tracé de loi de linéarisation - Instruction "**PlotLINE**"

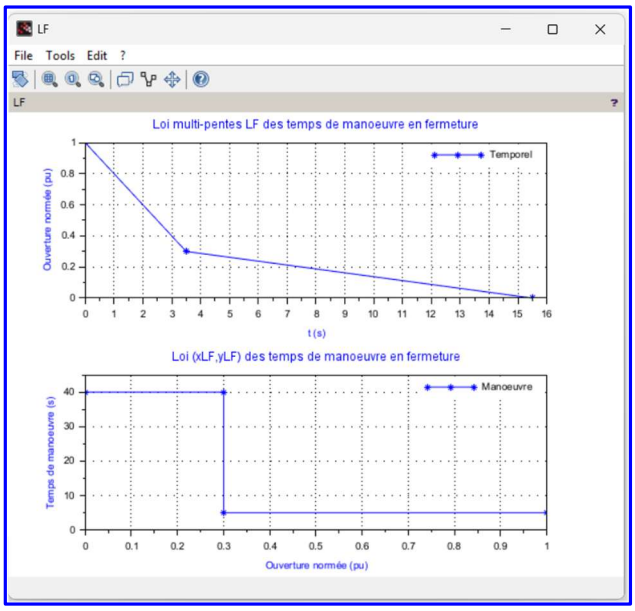


Figure 176 : Exemple de tracé de loi des temps de manœuvre Instruction "**PlotLF**"

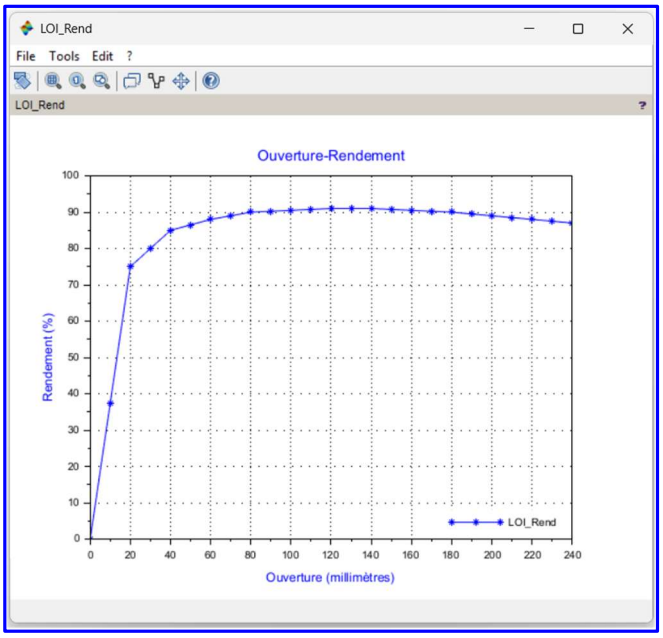


Figure 177 : Exemple de tracé de loi de rendement - Instruction "**PlotRend**"

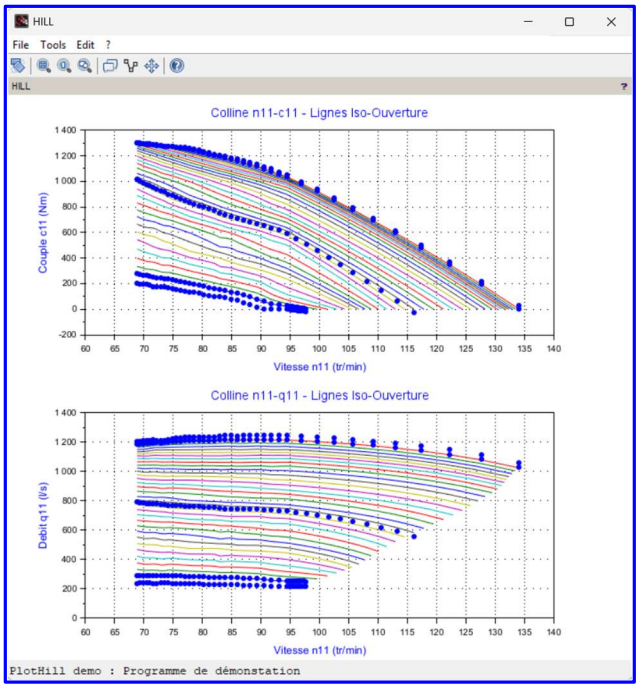


Figure 178 : Exemple de tracé de colline - Instruction "**PlotHill demo**"

4.9 Instruction « Interpoler » : rajout de points d'interpolation dans les lois de linéarisation

L'instruction HydroSim **Interpoler** permet de rajouter des points dans les lois de linéarisation.

Ce dispositif convient particulièrement lorsque les lois expérimentales ne sont connues que partiellement. L'extrapolation ne peut alors être correctement réalisée en dehors des segments connus, et il est nécessaire de rajouter des points approximatifs garantissant une cohérence sur l'ensemble de la course du servomoteur.

Cette instruction n'est prise en compte que si bLOQ=1.

Le lecteur se reportera au chapitre « **Rajout de points d'interpolation dans les lois de linéarisation** » du « guide d'installation et de d'utilisation », décrivant cette instruction.

```
//Interpoler("o=183.3, p=210");  // Insertion d'un point à l'ouverture 183.3 mm Puissance 210 MW - Le rendement est recalculé
Interpoler("o=44, p=35");        // Insertion d'un point à l'ouverture 44 mm Puissance 35 MW - Le rendement est recalculé


Interpoler("o=Omav, p=0");       // Insertion du point de fonctionnement en marche à vide (Puissance électrique nulle)
```

Figure 179 : Utilisation de la fonction HydroSim 'Interpoler'

4.10 Calcul analytique des lois de linéarisation

4.10.1 Principe

Dans les nouvelles versions de HydroSim, les lois de linéarisation, si elles ne sont pas connues (bLOQ=0, FR2, PELT1 à PELT6), sont réalisées à partir d'une simulation numérique du circuit d'adduction TurbAdduc.

Puis les débits et chutes calculés sont portés dans la relation $P = \eta.\rho.g.H.Q$ pour en déduire la puissance mécanique résultante.

Cette relation utilise le rendement η du groupe turbo-alternateur. Pour cette raison, HydroSim s'appuie sur une loi de rendement par défaut. Celle-ci est définie dans le fichier ***VariablesGlobales.sce***, disponible dans le répertoire ***HydroSim\macros***

```
// Loi Rendement par défaut
//-------------------------------------------------------------------------------------
Rend=[];
xRend=[0:00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70 0.80  0.90 1.00];          //Ouverture
yRend=[0.00 0.75 0.85 0.88 0.9 0.905 0.91 0.91 0.905 0.90 0.89];          //Rendement
```

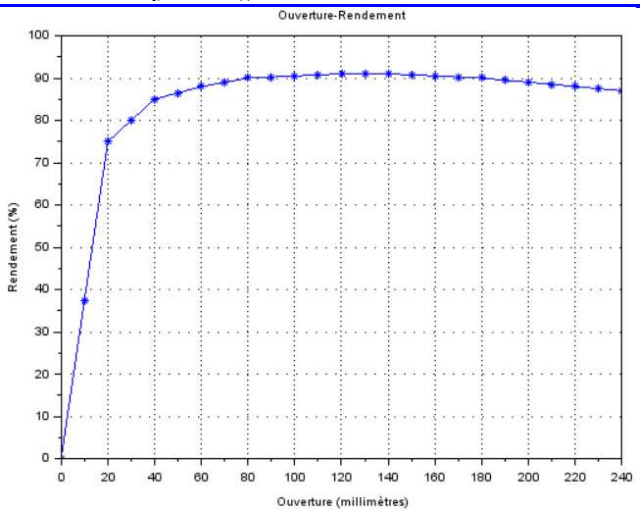


Figure 180 : Loi de rendement par défaut (Instruction de traçage : PlotRend FR2)

☞ La loi de rendement peut donc être modifiée, ou surchargée dans un fichier CFG, ce qui est préférable.

Si les lois de linéarisation sont connues (bLOQ=1), la même procédure est utilisée pour calculer les différentiels DifQ et DifH concernant les écarts entre le circuit simulé et les lois fournies.

5 PARAMETRES SPECIFIQUES AUX TURBINES PELTON – AXE HORIZONTAL OU VERTICAL - REPARTITEUR DE JET

5.1 Avant-propos

La nouvelle version de HydroSim, développée à partir de la version Scilab 6, apporte des simplifications notables dans la conception des schémas de simulation pour turbines PELTON à axe vertical.

En effet, la vectorisation du modèle SYSCOP permet son utilisation paramétrable par un nombre quelconque d'organes de réglage (ici, le nombre d'injecteurs).

Cela se traduit donc par une schémathèque unique « ***PELTON.zcos*** », ne comportant qu'un seul module SYSCOP (à la place d'une schémathèque pour turbines 4 injecteurs, 5 injecteurs, 6 injecteurs comportant autant de modules SYSCOP).

La conséquence directe est qu'une seule schémathèque PELTON couvre l'ensemble des représentations des machines à axe horizontal ou verticale, dès lors que la programmation du répartiteur de jets est appropriée en fonction du nombre d'injecteurs.

On note cependant la situation paradoxale qu'il faut programmer un répartiteur pour les turbines à axe horizontal 1 ou 2 jets.

Néanmoins, pour ces modèles, le répartiteur peut être inhibé avec la programmation RepOnOff=0.

5.2 Principe du répartiteur de jets pour machines PELTON.

5.2.1 Description générale

Ces paramètres concernent principalement les turbines PELTON multi-jets à axe vertical, pour la fonction de Répartiteur de jets.

Le principe et le fonctionnement du répartiteur de jets sont décrits dans [10] *page 73 à 81*.

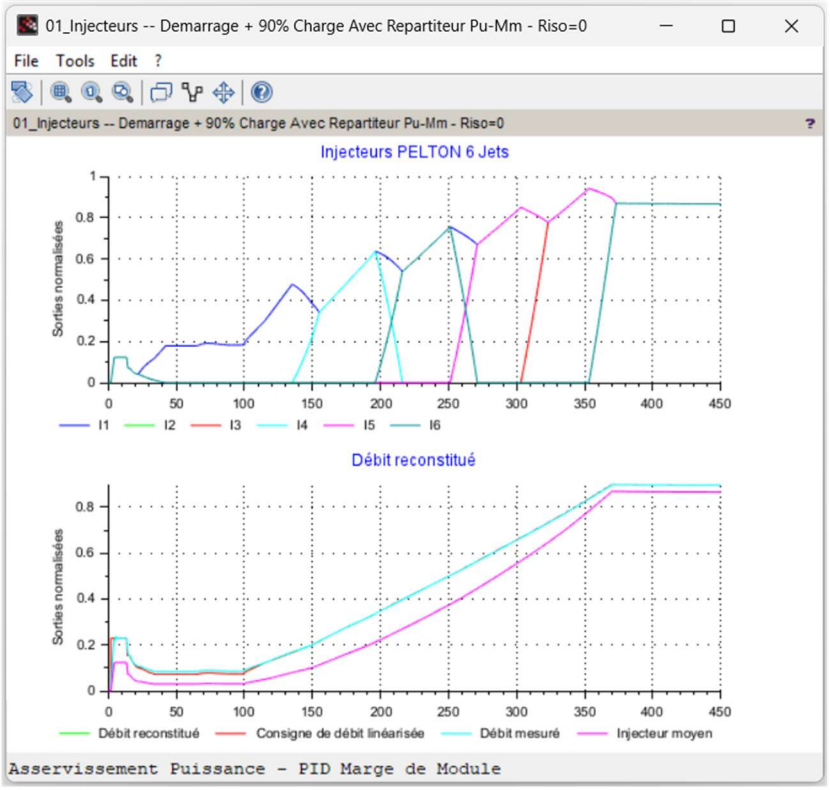


Figure 181 : Répartiteur de jet – Prise de charge 90% (Fichier (HydroSim\demos\PELTON\Pelt6\Standard\0 - Etudes Stabilité\Démarrage + 90% Charge Avec Répartiteur))

NJets	Nombre de jets de la turbine (su)	REPARTITEUR - XLS

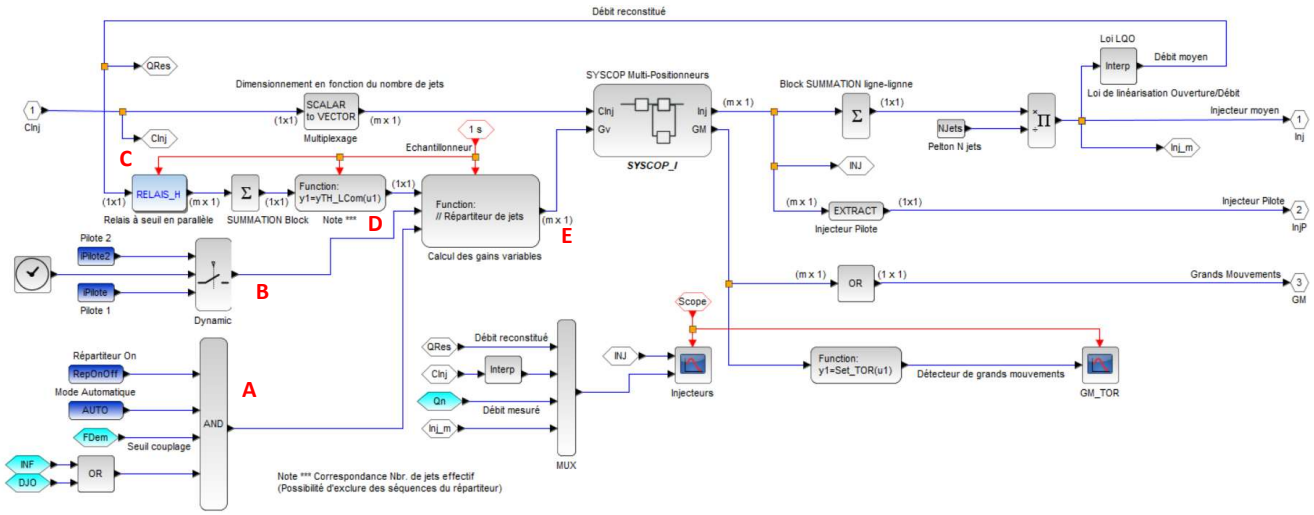


Figure 182 : Répartiteur de jets pour machine PELTON (*voir aussi B.1*)

5.2.2 Validation paramétrable du répartiteur de jets

RepOnOff	Répartiteur de jet On ou Off (su)	REPARTITEUR - XLS

RepOnOff	**0**	Le répartiteur de jet est définitivement désactivé
	1	Condition d'activation du Le répartiteur de jet

Lorsque RepOnOff=0, le répartiteur de jet est inactif. Cela signifie que tous les injecteurs suivent la consigne de l'injecteur pilote.

En **A**, lorsque RepOnOff=1, le répartiteur est actif si l'ensemble des conditions présentées ci-dessous sont remplies :

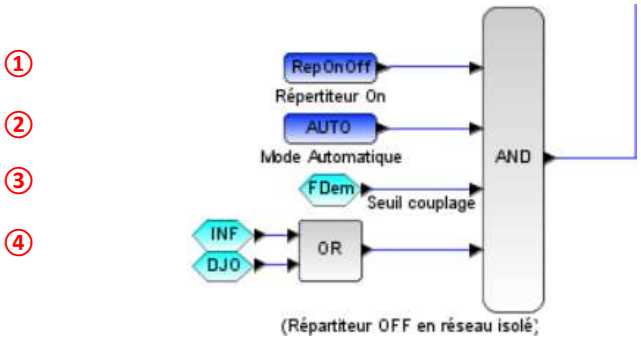


Figure 183 : Conditions de validation et d'activation du répartiteur de jet (extrait du module REPARTITEUR)

①	Le paramètre RepOnOff=1
②	Le simulateur doit être en mode automatique, soit MANU=0 (⇨AUTO=1)
③	Le seuil FDem de phase de mise au synchronisme du groupe a été validé (séquence interne au régulateur de vitesse, voir SPID)
④	Le réseau sur lequel fonctionne la machine est de type « Réseau interconnecté », soit Riso=0 (Fonctionnement réseau interconnecté (0) ou réseau isolé (1)) OU Le disjoncteur de groupe est ouvert (voir TDJF: Instant de fermeture du disjoncteur)

Ces conditions précisent, en conséquence, la séquence de démarrage de la turbine PELTON :

- Dès réception de l'ordre de marche (*voir **TStart***), l'ensemble des injecteurs participent à la mise en vitesse de la machine
- Lorsque le seuil de mise au synchronisme (voir seuil SPID et DJO=1), le signal FDem=1 et le répartiteur s'active. Dans ces conditions, tous les injecteurs ferment à l'exception de l'injecteur pilote qui participe à la mise au synchronisme du groupe.

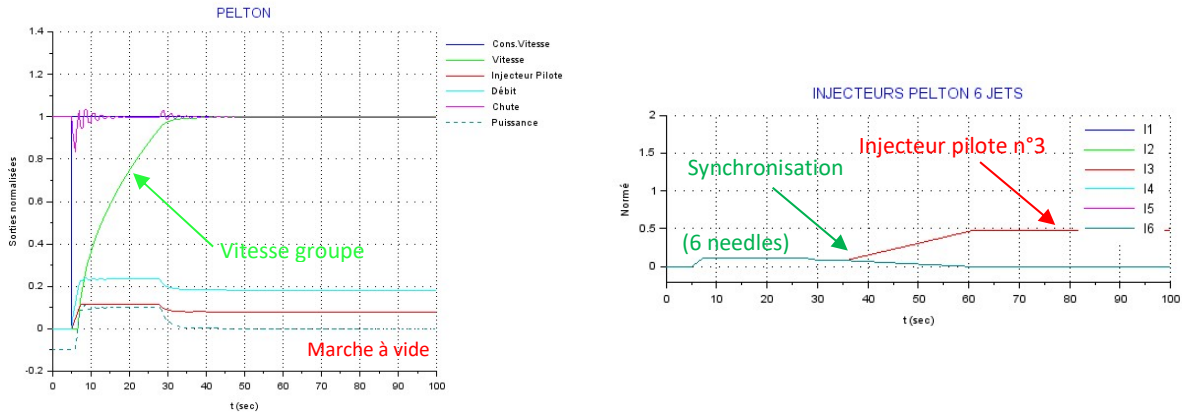


Figure 184 : Séquence de démarrage d'une turbine PELTON 6 jets avec injection pilote sur l'injecteur n°3

5.2.3 Sélection de l'injection pilote

iPilote	N° d'injecteur Pilote principal (su)	REPARTITEUR - XLS
iPilote2	N° d'injecteur Pilote secondaire (su)	REPARTITEUR - XLS
tPilote	Temps pour la commutation de l'injecteur pilote (s)	REPARTITEUR - XLS

En **B**, le circuit « REPARTITEUR » permet la commutation de l'injecteur pilote, Groupe en Marche.

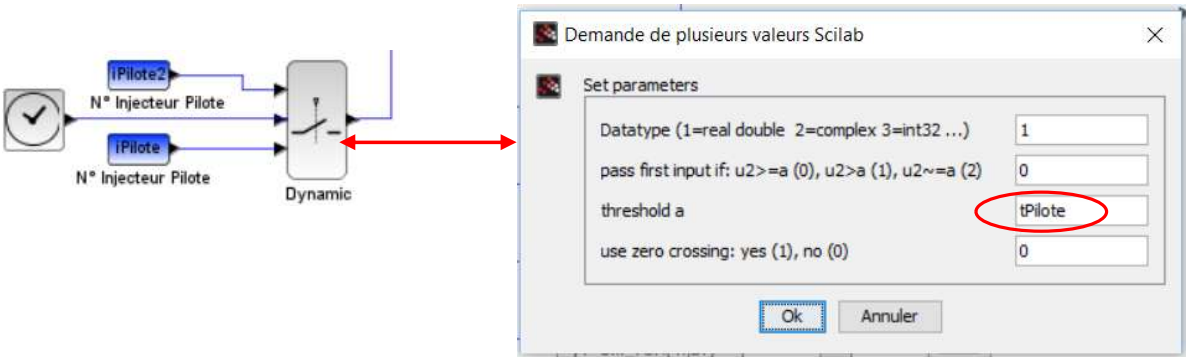


Figure 185 : Méthode de changement de l'injecteur pilote - Groupe en marche (extrait schéma REPARTITEUR)

Au temps **tPilote** programmable à partir d'un double-clic sur l'interrupteur dynamique, case threshold a, le numéro de l'injecteur pilote est modifié, entraînant un régime transitoire de fonctionnement des injecteurs.

L'opération est garantie pour minimiser la variation de puissance et de débit lorsque de temps de rampe du commutateur est optimisé.

5.2.4 Seuils de commutation des jets

SLCom1	Seuil de commutation à 1 jet (pu)	REPARTITEUR - XLS
SLCom2	Seuil de commutation à 2 jets (pu)	REPARTITEUR - XLS
SLCom3	Seuil de commutation à 3 jets (pu)	REPARTITEUR - XLS
SLCom4	Seuil de commutation à 4 jets (pu)	REPARTITEUR - XLS
SLCom5	Seuil de commutation à 5 jets (pu)	REPARTITEUR - XLS
SLCom6	Seuil de commutation à 6 jets (pu)	REPARTITEUR - XLS

```
// Seuils de commutation des jets
//-----------------------------------
SLCom1=-1;SLCom2=1/NJets;SLCom3=2/NJets;SLCom4=3/NJets;SLCom5=4/NJets;SLCom6=5/NJets;
;
//-------------------------------------------------------------------------------
// Seuils et Loi de commutation des jets PELTON
// Remarque : il est possible de by-passer une séquence en modifiant le nombre
// de jets alloués dans la table yTH_LCom
//-------------------------------------------------------------------------------
;
TH_LCom= [SLCom1 SLCom2 SLCom3 SLCom4 SLCom5 SLCom6];   // Seuils de commulation
yTH_LCom=[1      2      3      4      5      6     ];   // Nombre de jets engagés dans la séquence

TL_LCom=TH_LCom-0.001;                                  // Seuils bas avec hysteresis
```

Figure 186 : Exemple de programmation des seuils de commutation de jets – Fichier « HydroSim\demos\PELTON\Pelt6\StandardPelt6c.xls\»

Les seuils de commutation de jets présentés en *Figure 186* sont ici équidistants.

En réalité, il est nécessaire de programmer ces seuils en fonction de la loi Puissance/Rendement ou Débit/Rendement pour obtenir la meilleure efficience.

Un répartiteur de jets pour machine PELTON est une fonction permettant l'optimisation du rendement de la machine en fonction de la puissance demandée, par action sur le nombre de jets à mettre en service.

À titre d'exemple, la *Figure 187* indique que pour satisfaire une demande de production de 12.5 % de la puissance nominale, le gain sur le rendement, en fonctionnement sur 1 jet, est respectivement :

- 1% par rapport à un fonctionnement à 2 jets
- d'environ 2% par rapport à un fonctionnement à 4 jets

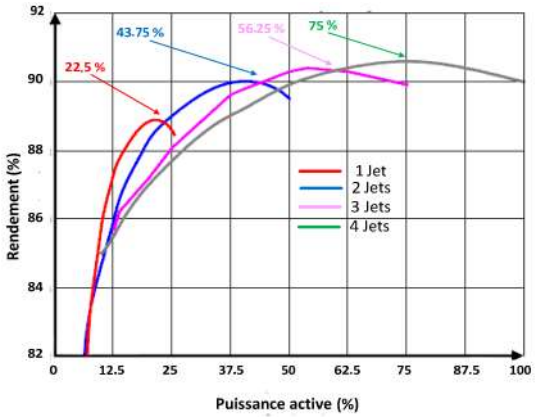


Figure 187 : Courbes de rendement d'une PELTON 4 jets

5.2.5 Relais multivariable de commutation avec hystérésis RELAIS_H



En **C**, le composant **Relais_H** représente un relais relais multiple en parallèle sur le signal d'entrée débit (ou puissance)

Son principe de fonctionnement est décrit dans le document « **HYDROTUR - SEGPAL - Guide de référence version xx** ».

On peut considérer aussi l'équivalence de ce composant comme indiqué ci-dessous :

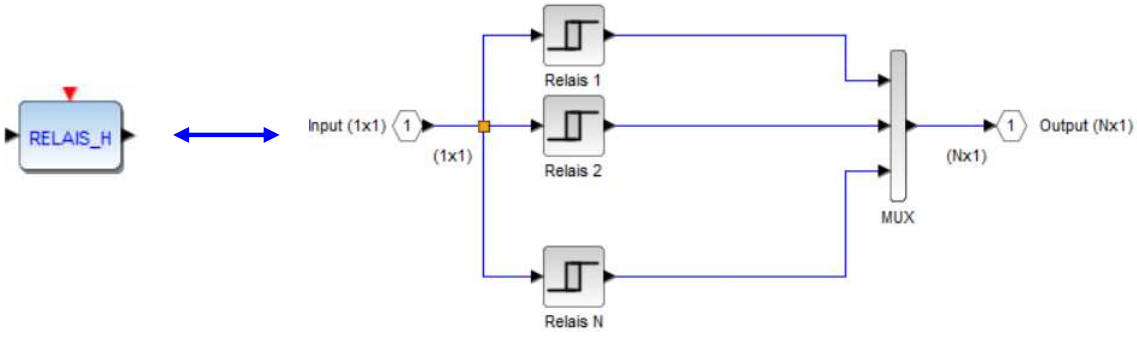


Figure 188 : Principe du relais multiple RELAIS_H.

Le sommateur en aval du composant **RELAIS_H** donne le nombre d'injecteurs à mettre en service.La figure ci-dessous rappelle le fonctionnement du relais multiple :

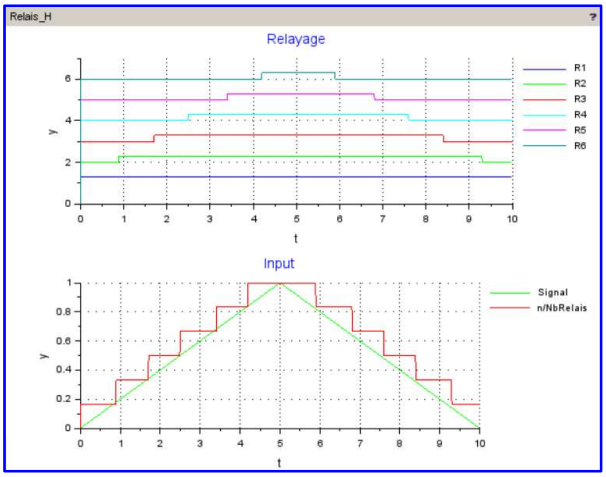


Figure 189 : Programme de test du composant RELAIS_H pour une PELTON 6 jets

Les seuils de commutation sont tabulés dans deux matrices colonne **TH_LCom** et **TH_LCom** dans le fichier de paramétrage «.*HydroSim\demos\PELTON\Peltx\StandardPeltxc.xls*\», comme indiqué en *Figure 186*, prenant en compte une hystérésis programmée.

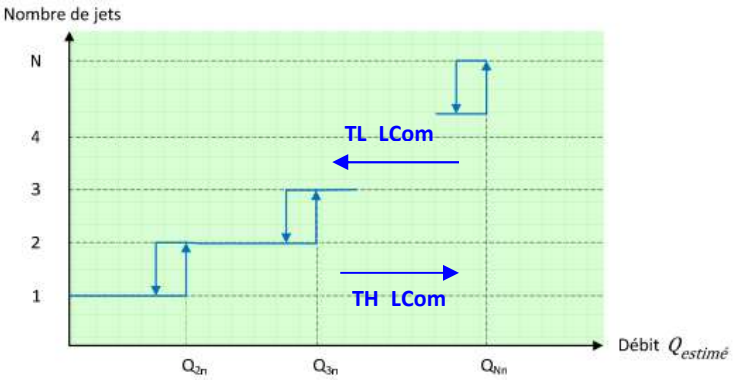


Figure 190 : Seuils de commutation des jets Injecteurs - Hystérésis réglés à TL_LCom=TH_LCom-0.001 par défaut

Un double clic sur le composant **RELAIS_H** provoque l'affichage de sa boite de programmation :

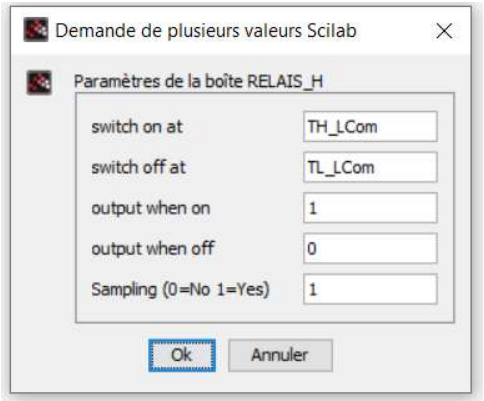


Figure 191 : Boite de programmation du composant **RELAIS_H**

5.2.6 Inhibition possible de séquences particulières

En **D**, la fonction « y1=yTH_LCom(u1) » 

, permet de confirmer ou de modifier le nombre d'injecteurs à mettre en service. Ainsi, il est possible de « by-passer » une séquence si les conditions d'exploitation l'imposent.

Cette fonction utilise la table **yTH_LCom** indiquée en *Figure 186*.

Par exemple, pour ne «by-passer» aucune séquence dans une PELTON 6 jets, le programmeur indiquera typiquement :

yTH_LCom=[1 2 3 4 5 6]; // Nombre de jets engagés dans la séquence

Pour «by-passer» la séquence 5 jets, soit en passant directement de la séquence 4 jets à la séquence 6 jets, le programmeur indiquera :

yTH_LCom=[1 2 3 4 4 6]; // Nombre de jets engagés dans la séquence

Ou bien

yTH_LCom=[1 2 3 4 6 6]; // Nombre de jets engagés dans la séquence

5.2.7 Fonction de répartiteur



Enfin, en **E**, la fonction échantillonnée « *Repartiteur_Jets.sci* » répartit le nombre de jets à mettre en service, avec une distribution prenant en compte les efforts radiaux exercés sur l'axe de la roue PELTON.

5.2.8 Calcul des efforts radiaux sur la roue PELTON – Détection d'asymétrie

Ce paragraphe est nécessaire à la bonne compréhension du choix des séquences injecteurs décrites dans la fonction répartiteur de jets d'une machine PELTON.

La fonction de calcul des efforts sur une roue PELTON[9], est parfois imposée dans certains cahiers des charges. Elle permet une détection d'asymétrie des efforts produits sur l'arbre turbine.

Cette asymétrie est due aux différences entre les positions des aiguilles (discordance de positionnement, erreur de poursuite des servomoteurs sur leurs consignes de positionnement, …) ou éventuellement à la fermeture complète des injecteurs ordonnée par l'algorithme de répartiteur de jets.

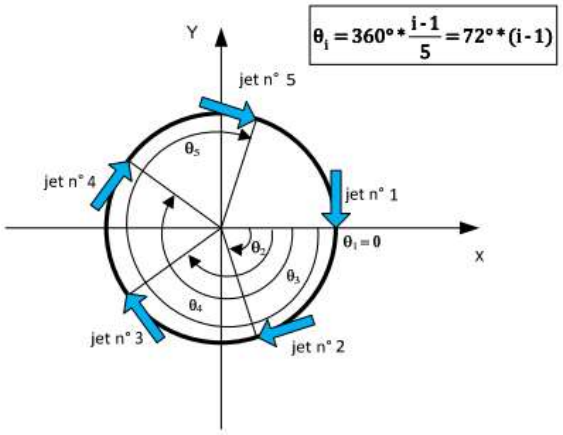


Figure 192 : Détection d'efforts radiaux sur une Pelton 5 jets

La conséquence d'une détection d'asymétrie est un échauffement des paliers machine, avec un risque dommageable pour l'installation.

5.2.9 Sélecteur de jets PELTON

PELTON	Nbr. d'injecteurs en service	A	B	C	D	E	F
4 jets	1	●					
	2	●		●			
	3	●	●	●			
	4	●	●	●	●		
5 jets	1	●					
	2	●		●			
	3	●		●		●	
	4	●	●	●		●	
	5	●	●	●	●	●	
6 jets	1	●					
	2	●			●		
	3	●		●		●	
	4	●	●		●	●	
	5	●	●	●	●	●	
	6	●	●	●	●	●	●

[9] **Une note de calcul PeltEff.xlsx est disponible dans le répertoire HydroSim\TURBINES\PELTON\Utilitaires\, et présentée ici en B.3**

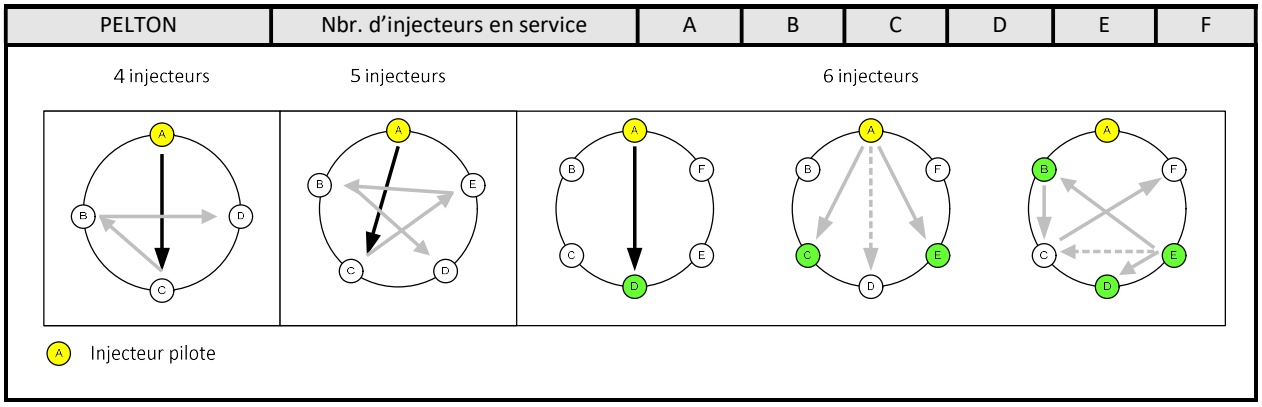


Figure 193 : Sélecteur de jets PELTON

Le tableau ci-dessus indique les séquences d'injecteurs à mettre en œuvre, en fonction du nombre de jets à ouvrir ou à fermer, afin de minimiser les efforts produits sur la roue.

L'injecteur pilote est l'injecteur de référence (injecteur A). Les séquences d'ouverture des autres injecteurs (B-C-D…) sont ainsi déterminées à partir de l'injecteur pilote.

5.2.10 Principe du gain variable dans le positionneur des injecteurs PELTON

RampGV	Temps de rampe du commutateur de gain variable (s)	PELTON.ctx

RampGV définit le temps de commutation des gains variables, dans le commutateur de jets.

Pour rappel, quel que soit la distance à parcourir, les valeurs finales des positions des injecteurs doivent être synchronisées, afin de garantir l'égalité de débit et de puissance durant la commutation, en particulier lorsque l'on change l'injecteur pilote, groupe en marche

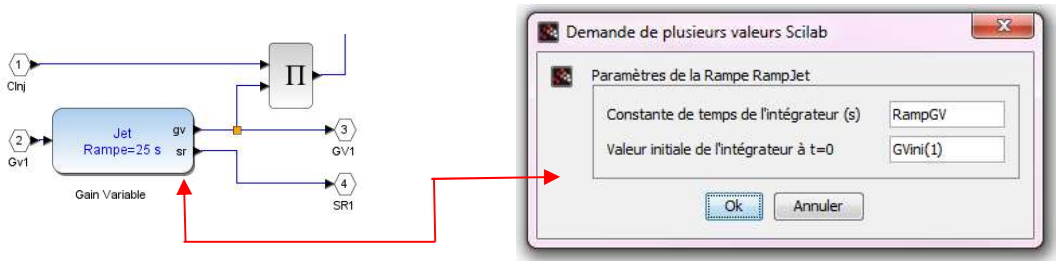


Figure 194 : Multiplication de la consigne Injecteur par un gain variable - Extrait schéma SYSCOP Injecteur

Le transitoire de commutation est assuré en modifiant linéairement le gain variable de la boucle de positionnement de chaque injecteur, en fonction du temps.

Bien que le temps T de commutation puisse être optimisé en fonction de la course à effectuer par le vérin de chaque servomoteur, il est préférable de fixer un temps de commutation unique, égal au plus grand des temps de manœuvre « pleine ouverture », « pleine fermeture » des injecteurs, ces deux informations étant programmables par l'interface opérateur.

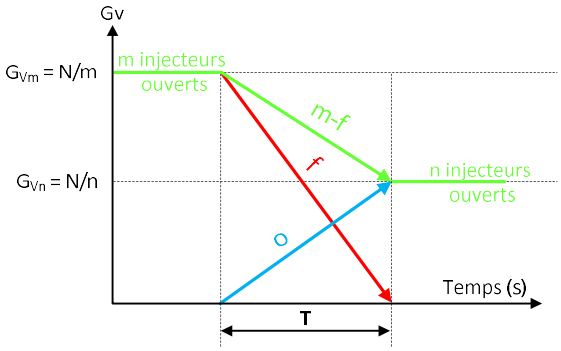


Figure 195 : Commutation d'injecteurs d'une roue PELTON

On obtient ainsi le tableau des gains transitoires suivant :

Injecteurs	m injecteurs ouverts	Transition m➔n	n injecteurs ouverts
Restant ouvert (m-f)	$G_{Vm} = \frac{N}{m}$	$G_{Vm\to n}(t) = \frac{\frac{N}{n} - \frac{N}{m}}{T}t + \frac{N}{m}$	$G_{Vn} = \frac{N}{n}$
Se fermant (f)	$G_{Vm} = \frac{N}{m}$	$G_{Vf\to 0}(t) = \frac{-\frac{N}{m}}{T}t + \frac{N}{m}$	0
S'ouvrant (o)	0	$G_{Vo\to n}(t) = \frac{\frac{N}{n}}{T}t$	$G_{Vn} = \frac{N}{n}$

Figure 196 : Tableau des gains variables

5.3 Intérêt économique d'un répartiteur de jets

L'intérêt du répartiteur semble certain d'un point de vue économique. De la formule générale :

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

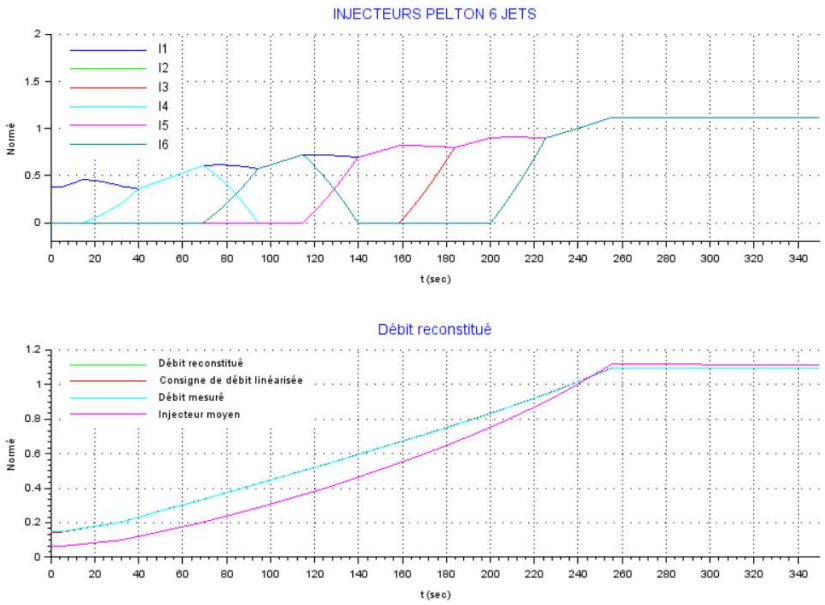
On obtient par exemple

$$Q_5 = \frac{\eta_4}{\eta_5} Q_4$$

, où Q_i et η_i désignent un débit et un rendement pour i injecteurs mis en service.

Autrement dit, si $\frac{\eta_4}{\eta_5} < 1$ on produit la même puissance en augmentant le nombre de jets, et en diminuant le volume d'eau turbiné

(*voir* [10] *page 176 à 178, ou B.2*)



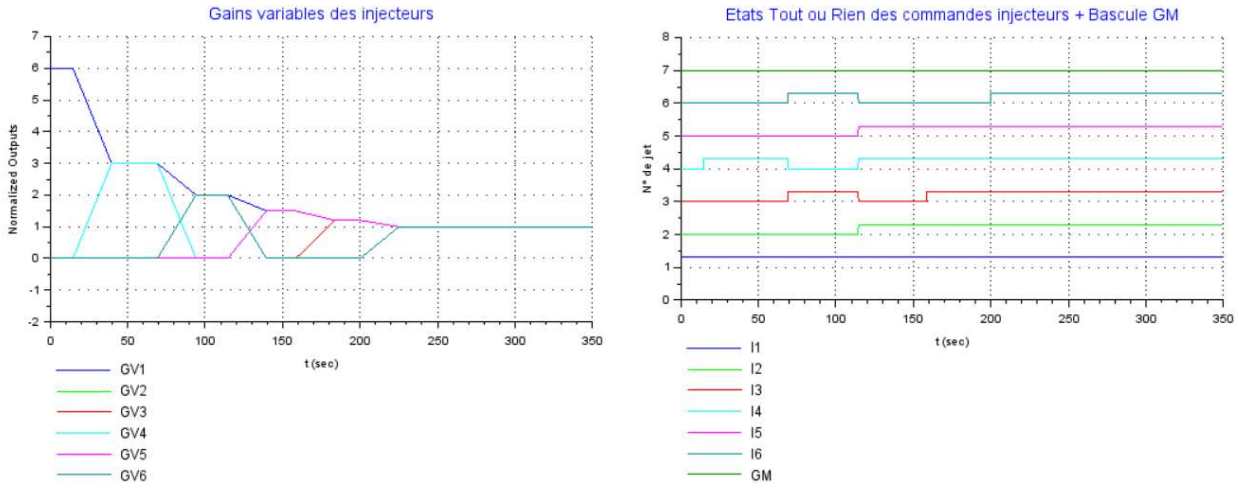


Figure 197 : Principe du commutateur de jets pour turbine PELTON 6 injecteurs – Prise de charge à 100% PU

6 COLLINES MACHINE

6.1 Généralités - Courbes caractéristiques à vitesse variable

Pour maitriser le comportement d'une turbine pendant les régimes transitoires (démarrage, mise en décharge brusque et emballement), il est utile d'en connaître les courbes caractéristiques à vitesse variable.

Pour ce faire, les turbiniers établissent, à l'aide d'essais sur modèles réduits, des abaques, valables pour une turbine, spécialement usinée, étudiés pour obtenir les meilleures efficiences des roues.

Ces courbes caractéristiques sont mesurées sur un banc d'essais dans un Laboratoire Hydraulique Expert, généralement sur des modèles avec une roue de 1 m de diamètre, sous 1 mètre de chute, d'où les indices « 11 » que l'on retrouve dans les indices des formules.

Ces essais sont réalisés sous une chute constante, une ouverture de turbine constante, un débit et une vitesse de rotation variables.

Les paramètres obtenus sont les suivants, en fonction de la vitesse de rotation « n » :

– débit Q (utile pour calcul du coup de bélier à l'emballement) ;

– rendement η (eta) ;

– couple C sur l'arbre turbine (utile pour calculer l'accélération du groupe et dimensionner le volant d'inertie).

De manière similaire aux courbes Q - H, ces courbes sont réunies sous forme d'abaque avec une colline des rendements.

Pour rendre ces courbes utilisables pour toute grandeur de turbine et toute hauteur de chute, les échelles sont converties sous une forme unitaire :

- Le débit Q devient débit unitaire Q 11 (ou q11)
- La vitesse n devient vitesse de rotation unitaire n11
- Le couple C devient couple unitaire C11 (ou c11)

En effet, des règles d'homothétie permettent alors de passer des caractéristiques des modèles réduits aux caractéristiques de la machine réelle.

Les grandeurs normalisées dans la modélisation sont :

✓ n_{11} : Vitesse de rotation unitaire d'une turbine de 1 m de diamètre fonctionnant sous 1 m de chute ($m^{1/2}.tr/min$)

$$n_{11} = \frac{n.D}{\sqrt{H}}$$ où n est la vitesse en tr/mn, D le diamètre de la roue, et H la chute nette en m.

✓ q_{11} : Débit unitaire d'une turbine de 1 m de diamètre fonctionnant sous 1 m de chute ($m^{1/2}/s$)

$$q_{11} = \frac{Q}{D^2.\sqrt{H}}$$ où Q est le débit en m^3/s

✓ c_{11} : Couple unitaire d'une turbine de 1 m de diamètre fonctionnant sous 1 m de chute (N/m^3)

$$c_{11} = \frac{C}{D^3.H}$$, où C est le couple en $N.m$

✓ p_{11} : Puissance unitaire d'une turbine de 1 m de diamètre fonctionnant sous 1 m de chute

$$p_{11} = \frac{P}{D^2.H^{3/2}}$$, où P est la puissance en W

☞ **On retrouvera ainsi ces calculs et leurs représentations dans les modules TurbAdduc, pour les circuits concernés.**

Les collines machine permettent de simuler le comportement du groupe, en prenant en compte le schéma de principe indiqué ci-dessous :

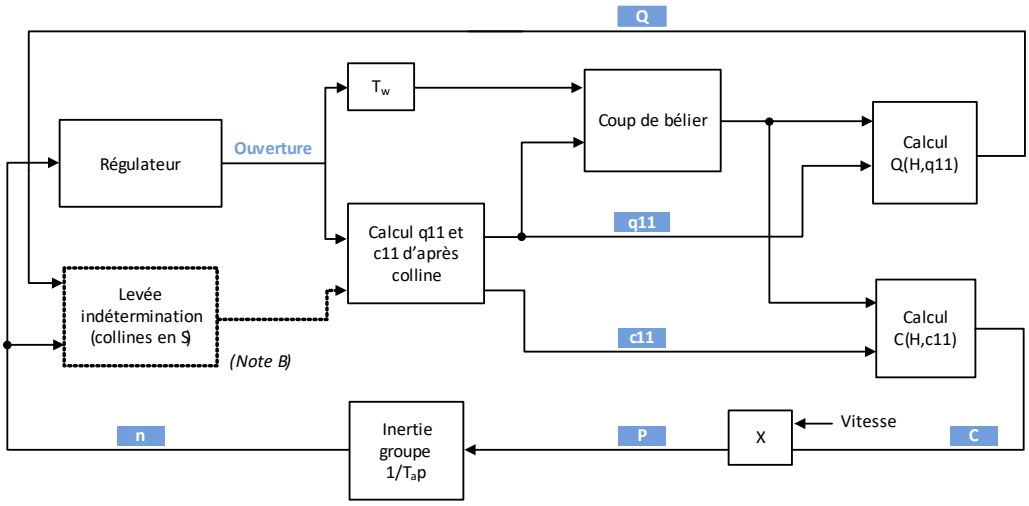


Figure 198 : Principe de modélisation avec les collines caractéristiques

6.2 Organisation

Les collines machine sont chargées lors du lancement du fichiers « **SCE** » du modèle prenant ces données en, ou bien dans une séquence « **Replay** » d'un enregistrement dans le répertoire correspondant.

Les routines d'interpolation des collines Machine, et leurs chargeurs, sont disponibles dans le répertoire « **macros** » de **HydroSim**.

Actuellement, trois modèles sont disponibles ; ils peuvent être étendus et améliorés dans les études :

Modèle	Chargeur	Interpolateur
FR4 pour machine FRANCIS	ChargeurColline4.sci	Intercol4.sci
FR5 pour machine FRANCIS	ChargeurColline5.sci	Intercol5.sci
KB1 pour machine Kaplan	ChargeurCollineKB_STD.sci	IntercolKB.sci

Dans ces modules, les interpolateurs sur les collines ont les points communs suivant, dans leurs résolutions dans les SOLVERS SCILAB ; les sorties de ces boîtes dépendent de l'algorithmique embarquée :

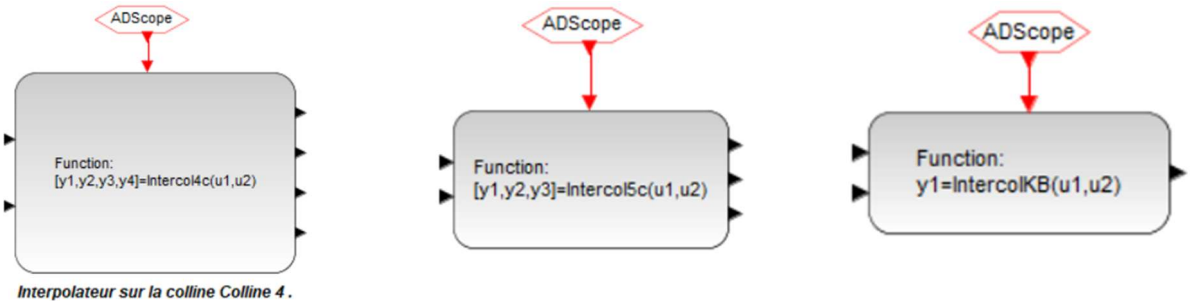


Figure 199 : Fonctions Collines dans les modules Xcos TurbAdduc FR4-FR5-KB1

- Les interpolateurs sont échantillonnés à la période **ADScope** 

. Cette contrainte de réalisation est due au fait qu'en l'absence d'échantillonnage, l'unité de calcul et de run-time de XCOS est saturée, et bloque tous calculs de façon rédhibitoire.
- La période ADScope peut être modifiée dans le composant « Système », commun à tous les circuits, et est fixée actuellement à 2 ms.

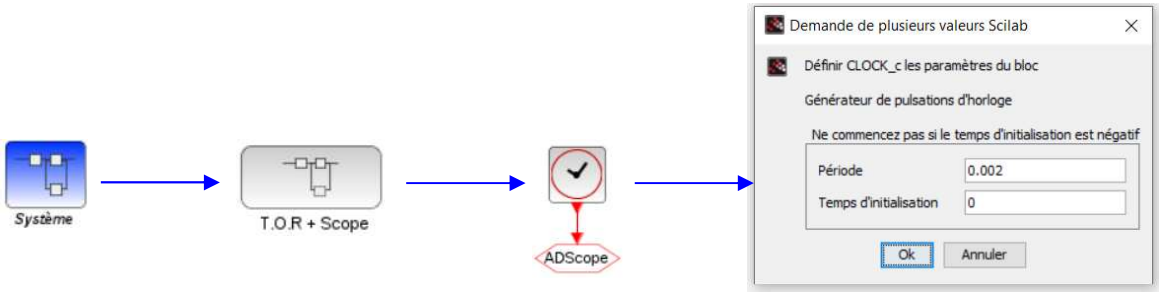


Figure 200 : Échantillonnage des interpolateurs - Colline Machine

- Les interpolateurs Xcos sont réalisés à partir du bloc standard « **scifunc_block_m** » accessible dans le sous-groupe « Fonctions définies par l'utilisateur » de la palette standard XCOS :

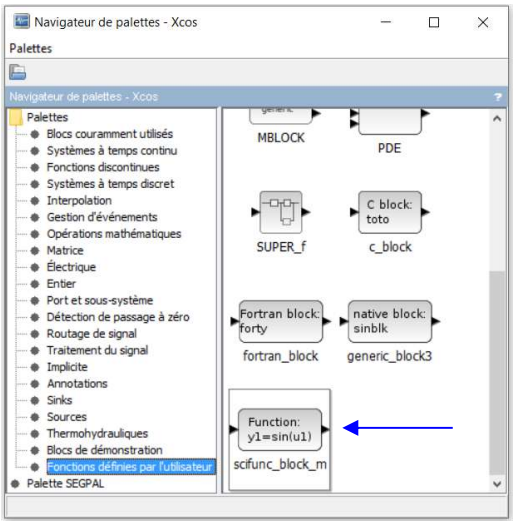


Figure 201 : Fonction « **scifunc_block_m** » dans la palette standard Xcos

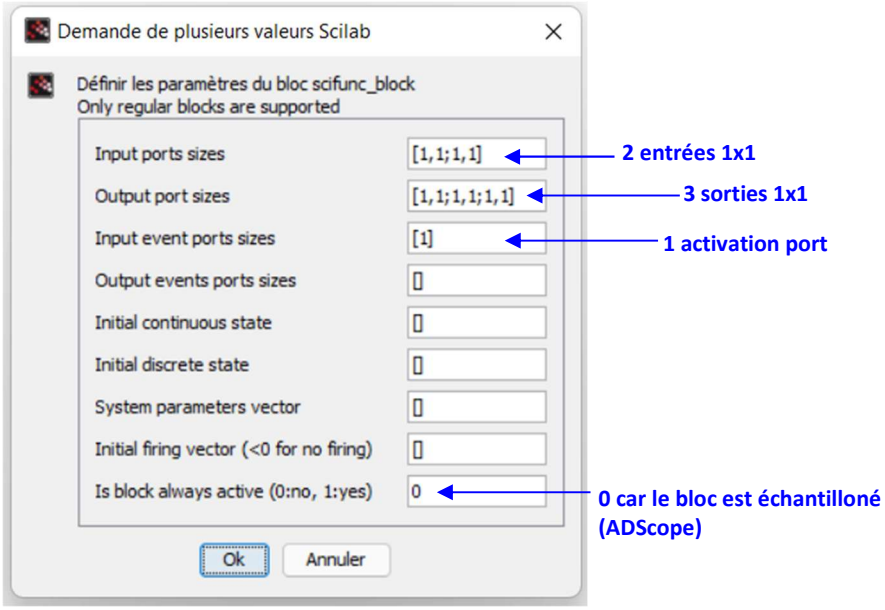


Figure 202 : Boîte fonctionnelle de l'interpolateur **Intercol5c** – circuit FR5 (Boîte 1/2)

6.3 Démonstrateur d'un interpolateur sur un colline machine

En saisissant la commande « **PlotHill demo** » dans la console Scilab, il est possible de visualiser le principe d'interpolation général sur les collines machines

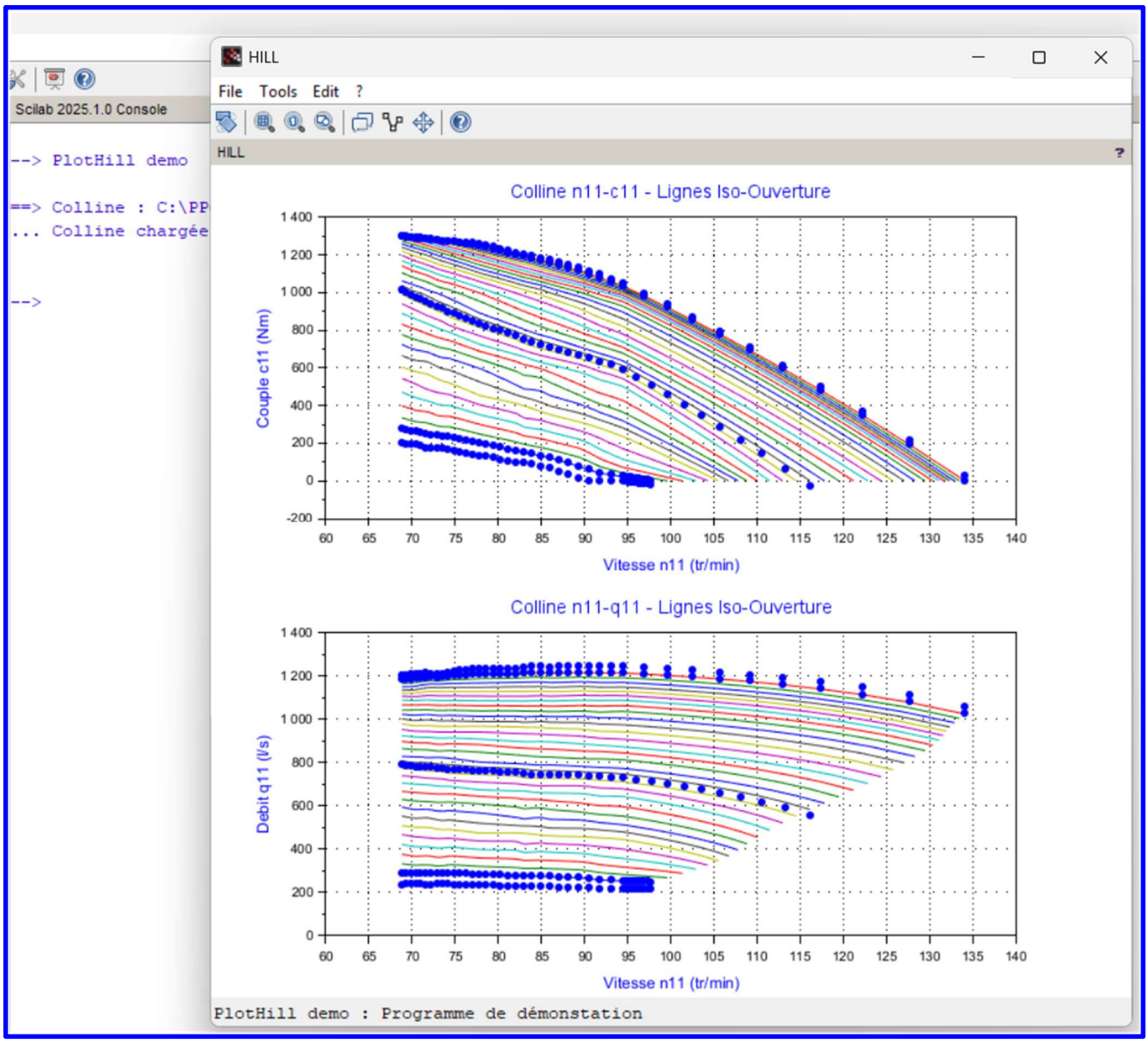


Figure 203 : Démonstrateur d'un interpolateur sur un colline machine

6.4 Collines pour Machine Francis type FR4

6.4.1 Représentation dans le circuit TurbAdduc

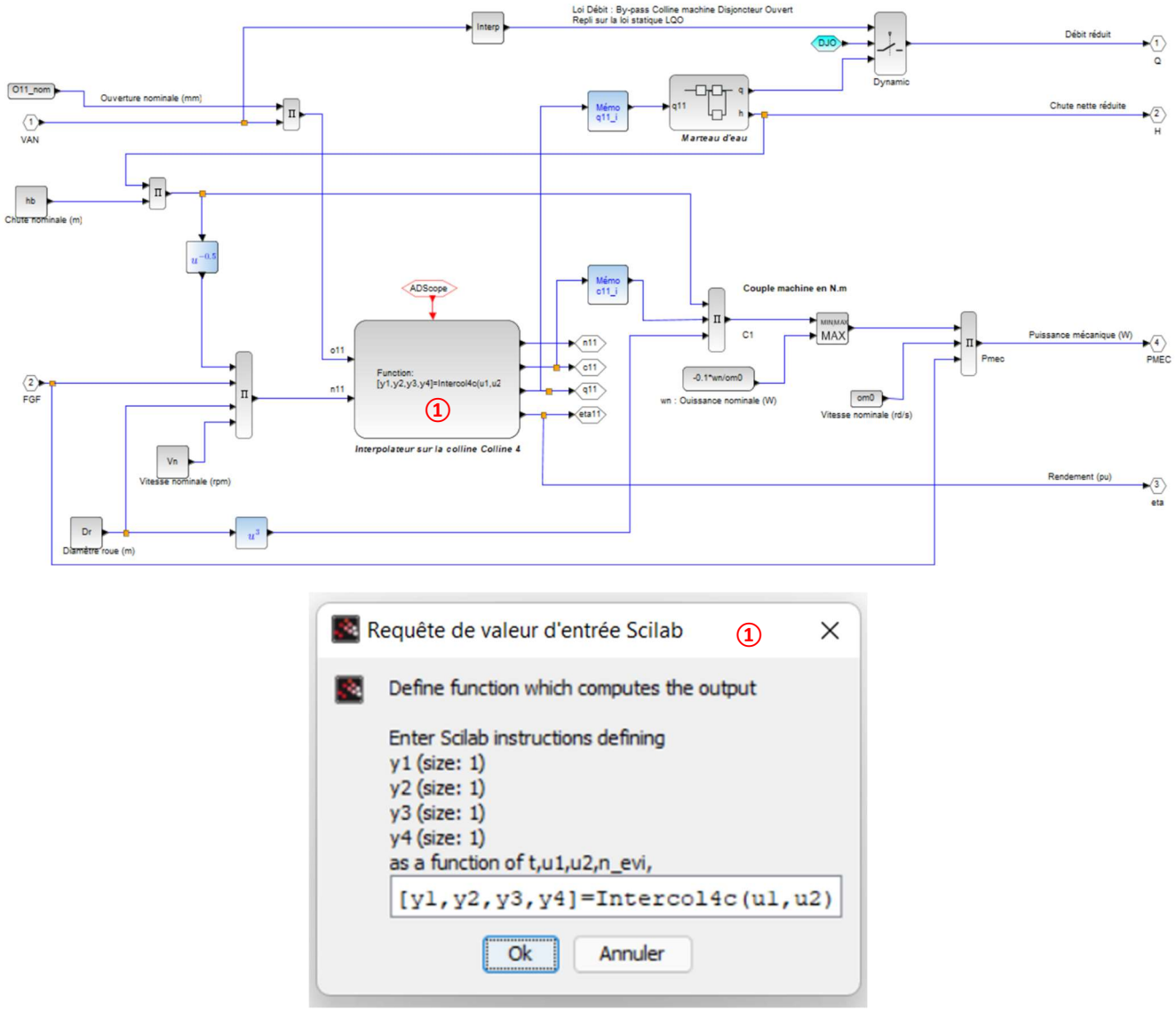
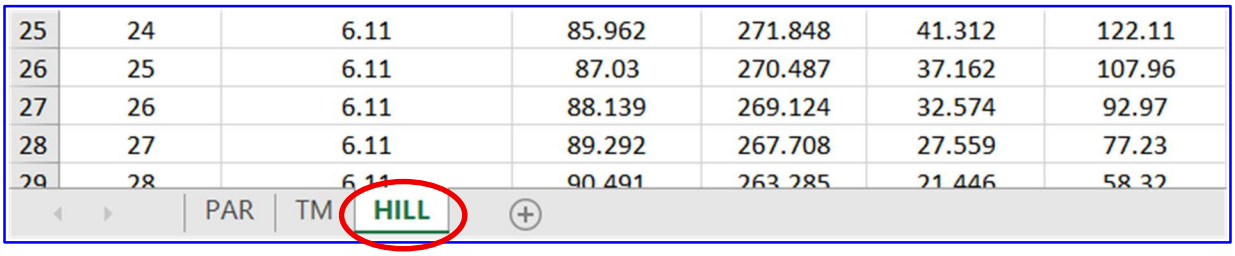


Figure 204 : Colline pour Machine FRANCIS Type FR4 – Interpolateur **Intercol4.sci** (Boîte 2/2)

6.4.2 Chargement des collines FR4

La colline à charger doit être présente dans une feuille nommée « **HILL** » du fichier de paramétrisation Excel, au format **XLS**



25	24	6.11	85.962	271.848	41.312	122.11
26	25	6.11	87.03	270.487	37.162	107.96
27	26	6.11	88.139	269.124	32.574	92.97
28	27	6.11	89.292	267.708	27.559	77.23
29	28	6.11	90.491	263.285	21.446	58.32

PAR | TM | HILL

Figure 205 : Déclaration et insertion de la colline machine FR4 dans le fichier de paramétrisation XLS

Elle est ensuite chargée par le loader « FR4_Loader » :

En fin d'exécution du script, si tous les formats ont été respectés, un message signale, dans la console Scilab, la bonne exécution de l'opération :

```
-------------------------------------------------------------------
Machine :         FRANCIS
Xcos Model :      FR4c.zcos
Project :         FR4c
-------------------------------------------------------------------

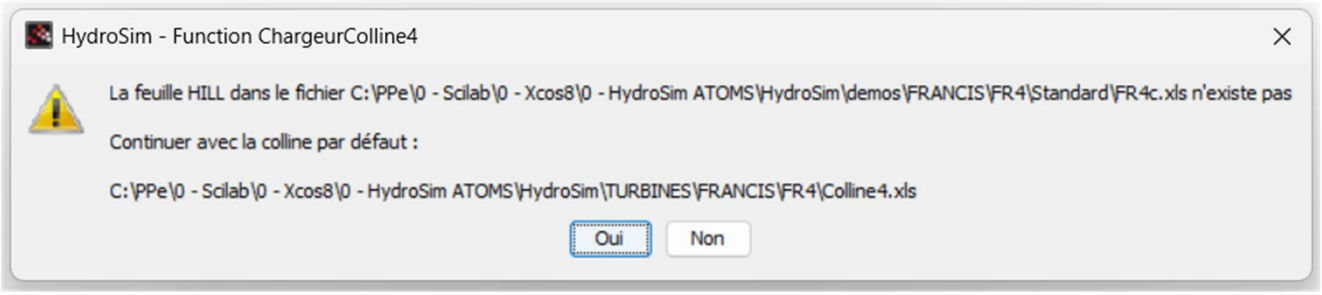
==> Hill : C:\PPe\0 - Scilab\0 - Xcos8\0 - HydroSim ATOMS\HydroSim\demos\FRANCIS\FR4\Standard\FR4c.xls
... Loaded Hill

Xcos Model : C:\PPe\0 - Scilab\0 - Xcos8\0 - HydroSim ATOMS\HydroSim\TURBINES\FRANCIS\FR4\FR4c.zcos

==> Hill : C:\PPe\0 - Scilab\0 - Xcos8\0 - HydroSim ATOMS\HydroSim\demos\FRANCIS\FR4\Standard\FR4c.xls
```

Figure 206 : Diagnostic de chargement d'une colline FR4 dans la console Scilab

Un message d'alerte est signalé si la feuille « HILL » n'existe pas :



Dans ce cas, HydroSim utilise une colline par défaut située dans le répertoire **HydroSim\TURBINES\FRANCIS\FR4\Colline4.xls** :

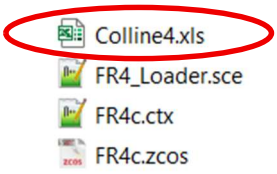


Figure 207 : Colline par défaut Colline4.xls

6.4.3 Format des collines FR4

Le fichier Colline FR4 (par exemple Collin4.txt) est un fichier texte comportant un ensemble de lignes. Les lignes sont séparées par un Retour Chariot (« \n » en langage C ou code ascii hexadécimal (0Dh 0Ah)

Chaque ligne est constituée d'un ensemble de 6 champs :

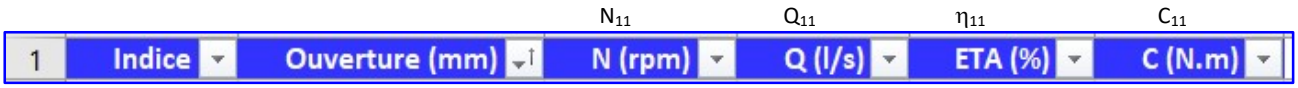


Figure 208 : Format des collines FR4

Les champs sont séparés par un caractère de tabulation (« \t » en langage C ou code ascii 09h)

Le tableau doit être impérativement trié :

- **D'abord par ouverture croissante**
- **Puis, pour chaque ouverture, par vitesse croissante n_{11}**

40	39	6.11	96.956	248.295	1.992	4.77
41	40	6.11	97.29	247.679	1.009	2.4
42	41	6.11	97.628	247.045	0	0
43	1	6.89	68.8	332.177	74.21	334.9
44	2	6.89	69.344	329.763	73.712	327.65
45	3	6.89	69.901	327.291	73.163	320.2
46	4	6.89	70.472	325.813	72.717	314.24
47	5	6.89	71.057	326.52	72.475	311.29
48	6	6.89	71.657	327.245	72.224	308.3

Figure 209 : Classement extrait du fichier Colline4.txt

On obtient ainsi des courbes d'iso-ouverture.

6.4.4 Tracé des collines FR4

En fin de simulation d'une séquence, il est possible de visualiser une colline en utilisant l'instruction **PlotHill** dans la console Scilab :

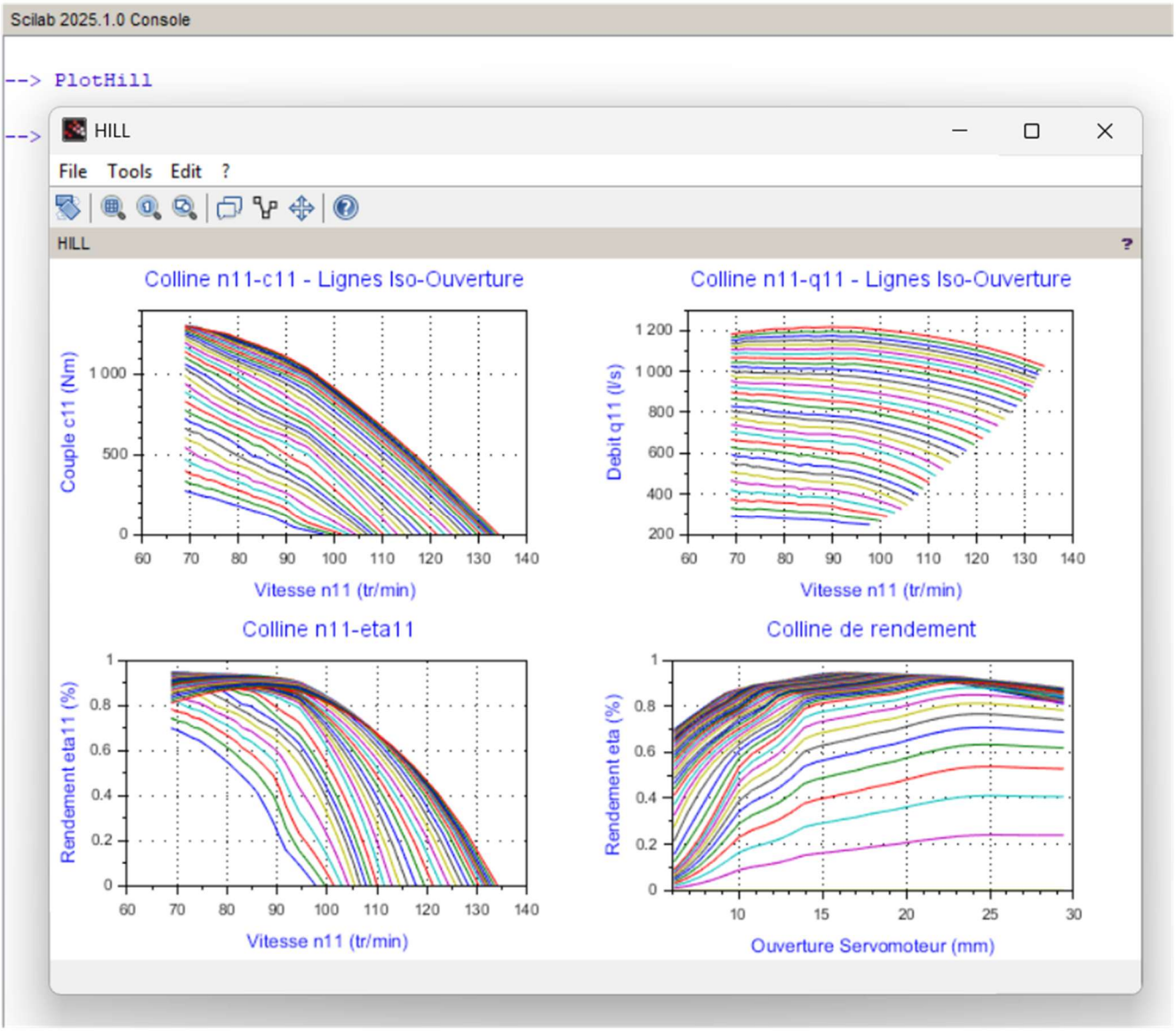


Figure 210 : Tracé de la colline FR4 dans la console Scilab

6.5 Collines pour Machine Francis type FR5

6.5.1 Représentation dans le circuit TurbAdduc

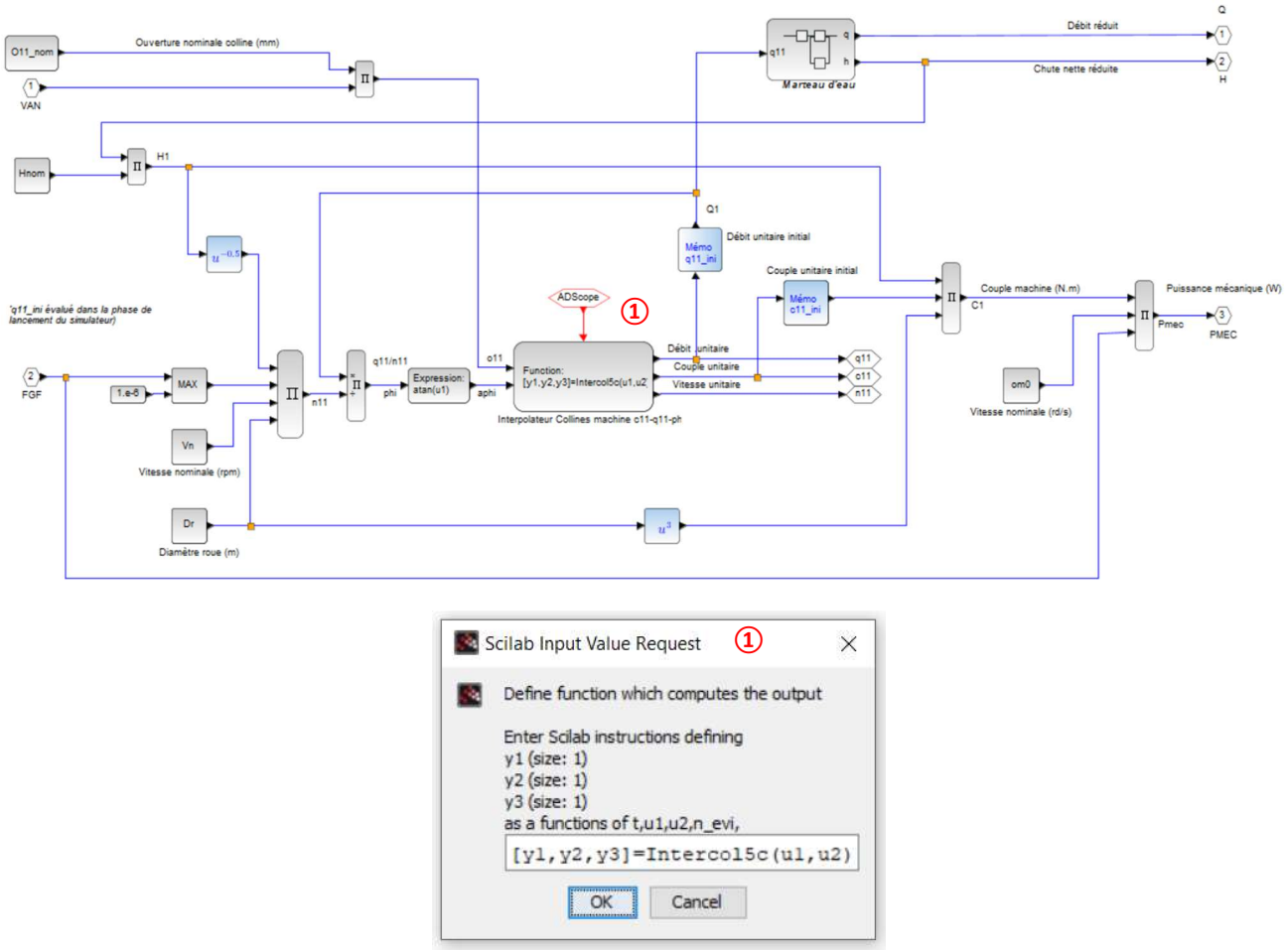
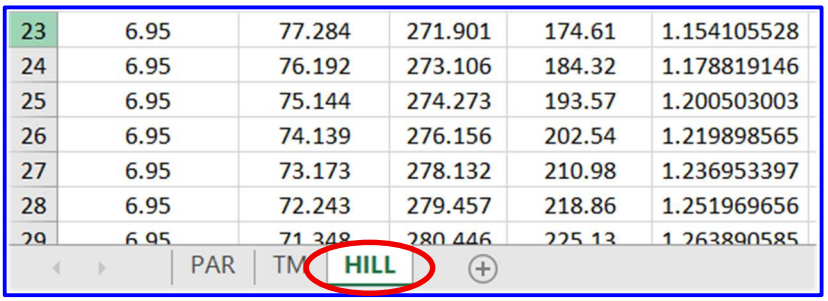


Figure 211 : Colline pour Machine FRANCIS Type FR5 – Interpolateur **Intercol5c.sci**[10] (Boîte 2/2)

6.5.2 Chargement des collines FR5

La colline à charger doit être présente dans une feuille nommée « **HILL** » du fichier de paramétrisation Excel, au format **XLS**



23	6.95	77.284	271.901	174.61	1.154105528
24	6.95	76.192	273.106	184.32	1.178819146
25	6.95	75.144	274.273	193.57	1.200503003
26	6.95	74.139	276.156	202.54	1.219898565
27	6.95	73.173	278.132	210.98	1.236953397
28	6.95	72.243	279.457	218.86	1.251969656
29	6.95	71.348	280.446	225.13	1.263890585

PAR TM HILL

Figure 212 : Déclaration et insertion de la colline machine FR5 dans le fichier de paramétrisation XLS

Elle est ensuite chargée par le loader « FR5_Loader » :

[10] *Voir aussi Figure 27*

En fin d'exécution du script, si tous les formats ont été respectés, un message signale, dans la console Scilab, la bonne exécution de l'opération :

```
-------------------------------------------------------------------
Machine :         FRANCIS
Modèle Xcos :     FR5c.zcos
Projet :          FR5c
-------------------------------------------------------------------

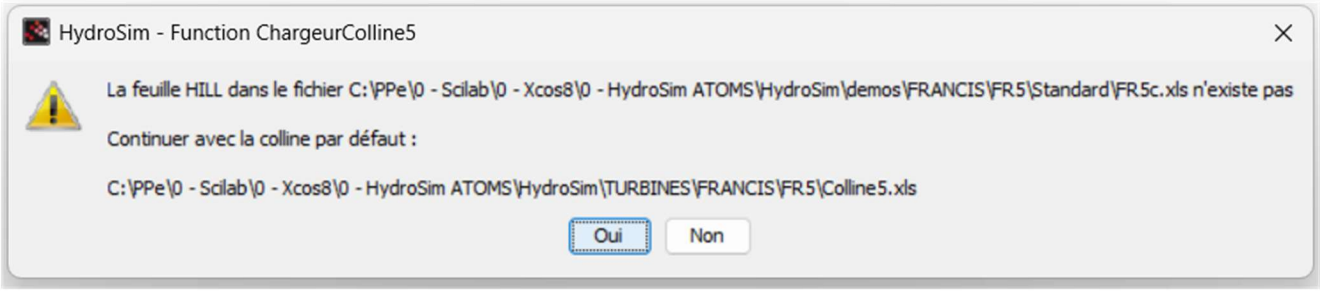
==> Colline : C:\PPe\0 - Scilab\0 - Xcos8\0 - HydroSim ATOMS\HydroSim\demos\FRANCIS\FR5\Standard\FR5c.xls
... Colline chargée

Modèle Xcos : C:\PPe\0 - Scilab\0 - Xcos8\0 - HydroSim ATOMS\HydroSim\TURBINES\FRANCIS\FR5\FR5c.zcos

==> Colline : C:\PPe\0 - Scilab\0 - Xcos8\0 - HydroSim ATOMS\HydroSim\demos\FRANCIS\FR5\Standard\FR5c.xls
```

Figure 213 : Diagnostic de chargement d'une colline FR5 dans la console Scilab

Un message d'alerte est signalé si la feuille « HILL » n'existe pas :



Dans ce cas, HydroSim utilise une colline par défaut située dans le répertoire **HydroSim\TURBINES\FRANCIS\FR5\Colline5.xls** :

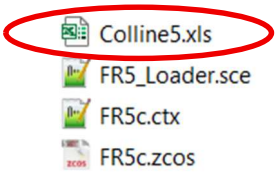


Figure 214 : Colline par défaut Colline5.xls

6.5.3 Format des collines FR5

Le fichier Colline FR5 (par exemple Collin5.txt) est un fichier texte comportant un ensemble de lignes. Les lignes sont séparées par un Retour Chariot (« \n » en langage C ou code ascii hexadécimal (0Dh 0Ah)

Chaque ligne est constituée d'un ensemble de 5 champs :

	N_{11}	Q_{11}	C_{11}	φ_{11}
Ouverture (mm)	Vitesse (rpm)	Débit (l/s)	Couple (Nm)	Angle (rd)

Figure 215 : Format des collines FR5

Les champs sont séparés par un caractère de tabulation (« \t » en langage C ou code ascii 09h)

Sur chaque ligne on peut vérifier la relation, pour un diamètre de roue modèle Dr=1 m :

$$\varphi_{11} = \text{atan}\left(\frac{q_{11}}{n_{11}}\right)$$

, atan représente la fonction mathématique « Arc Tangente ».

Le tableau doit être impérativement trié :

- **D'abord par ouverture croissante**
- **Puis, pour chaque ouverture, par angle croissant φ_{11}**

	A	B	C	D	E
1	Ouverture (m	Vitesse (rp	Débit (l	Couple (N	Angle (rd
2	6.95	92.954	251.533	0	0
3	6.95	92.353	252.735	7.63	0.082430573
4	6.95	91.763	253.871	15.07	0.162774414
5	6.95	91.185	254.946	22.32	0.240056985
6	6.95	90.617	255.965	29.39	0.313627669
7	6.95	90.06	256.931	36.29	0.383049976

Figure 216 : Classement extrait du fichier Colline5.txt

On obtient ainsi des courbes d'iso-ouverture.

6.5.4 Tracé des collines FR5

En fin de simulation d'une séquence, il est possible de visualiser une colline en utilisant l'instruction **PlotHill** dans la console Scilab :

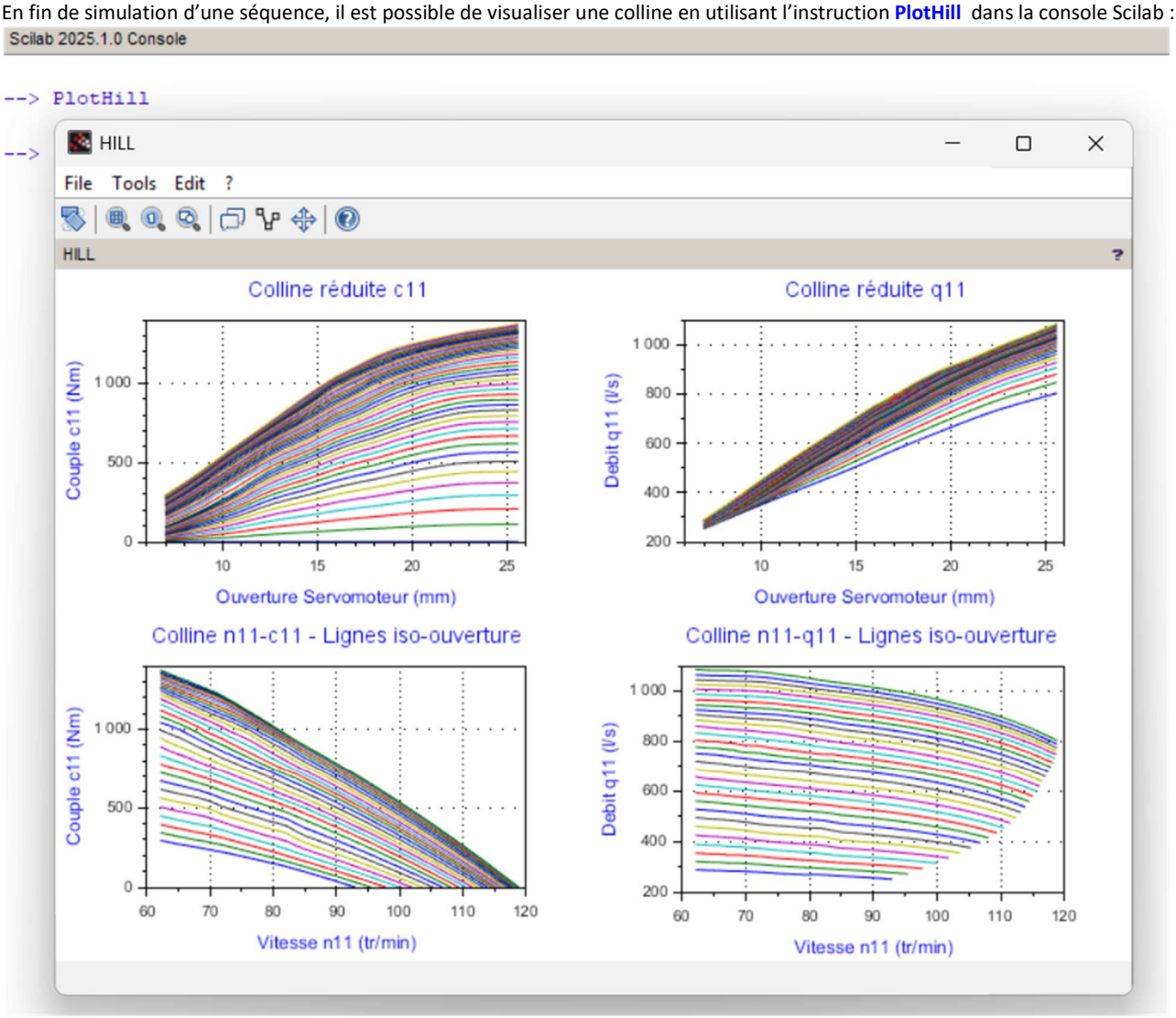
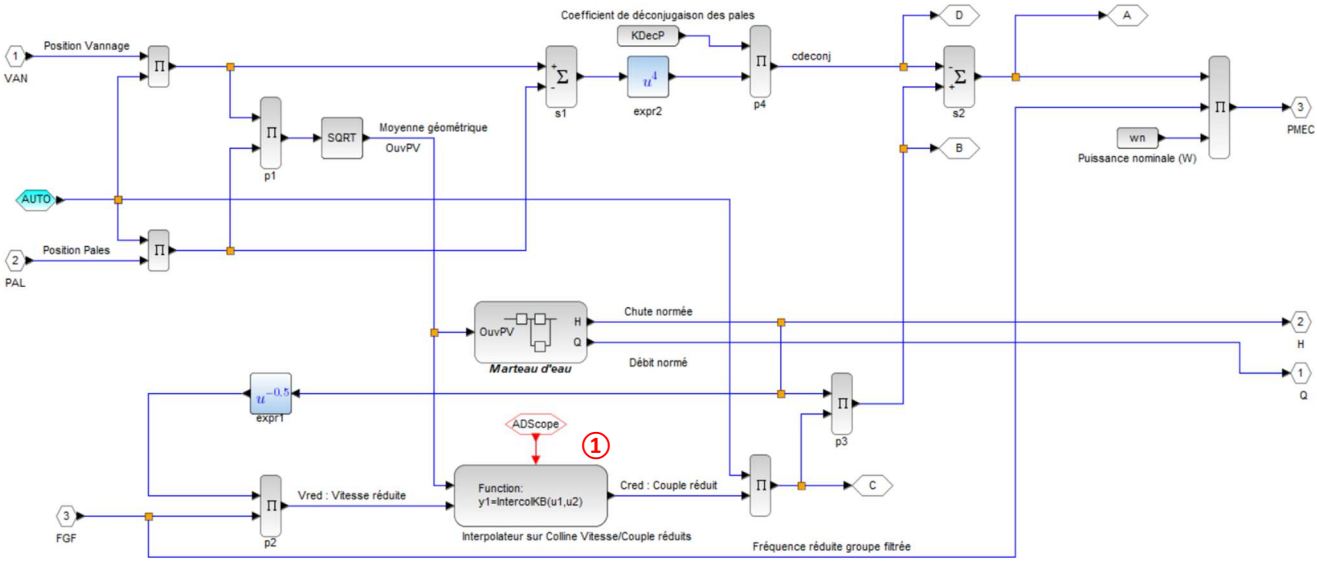


Figure 217 : Tracé de la colline FR5 dans la console Scilab

6.6 Colline analytique pour Machine Kaplan KB1

6.6.1 Représentation dans le circuit TurbAdduc



L'interpolateur est réalisé par la fonction **IntercolKB**.

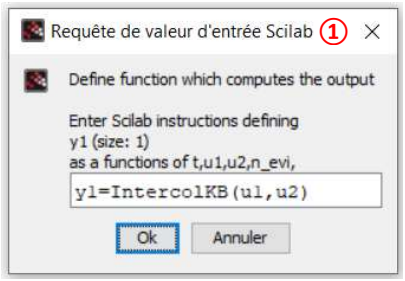


Figure 218 : Colline pour Machine Kaplan KB1 – Interpolateur **IntercolKB** (Boîte 2/2)

6.6.2 Tracé de la colline KAPLAN

En fin de simulation d'une séquence, il est possible de visualiser une colline en utilisant l'instruction **PlotHill** dans la console Scilab :

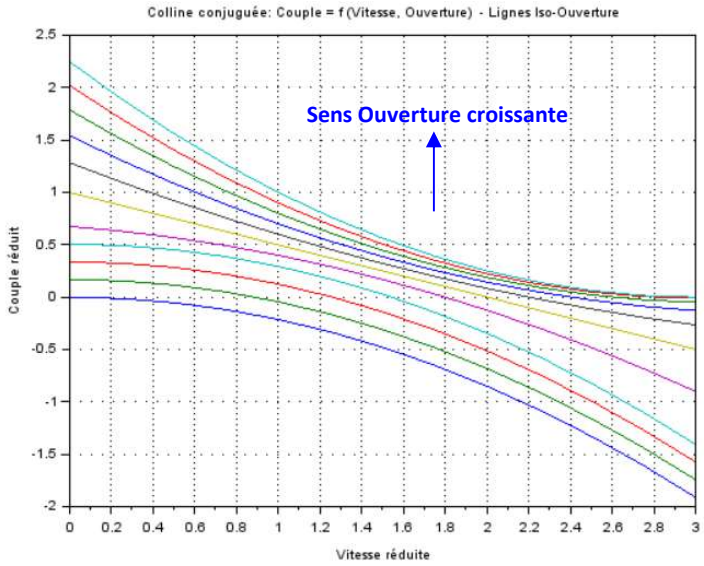
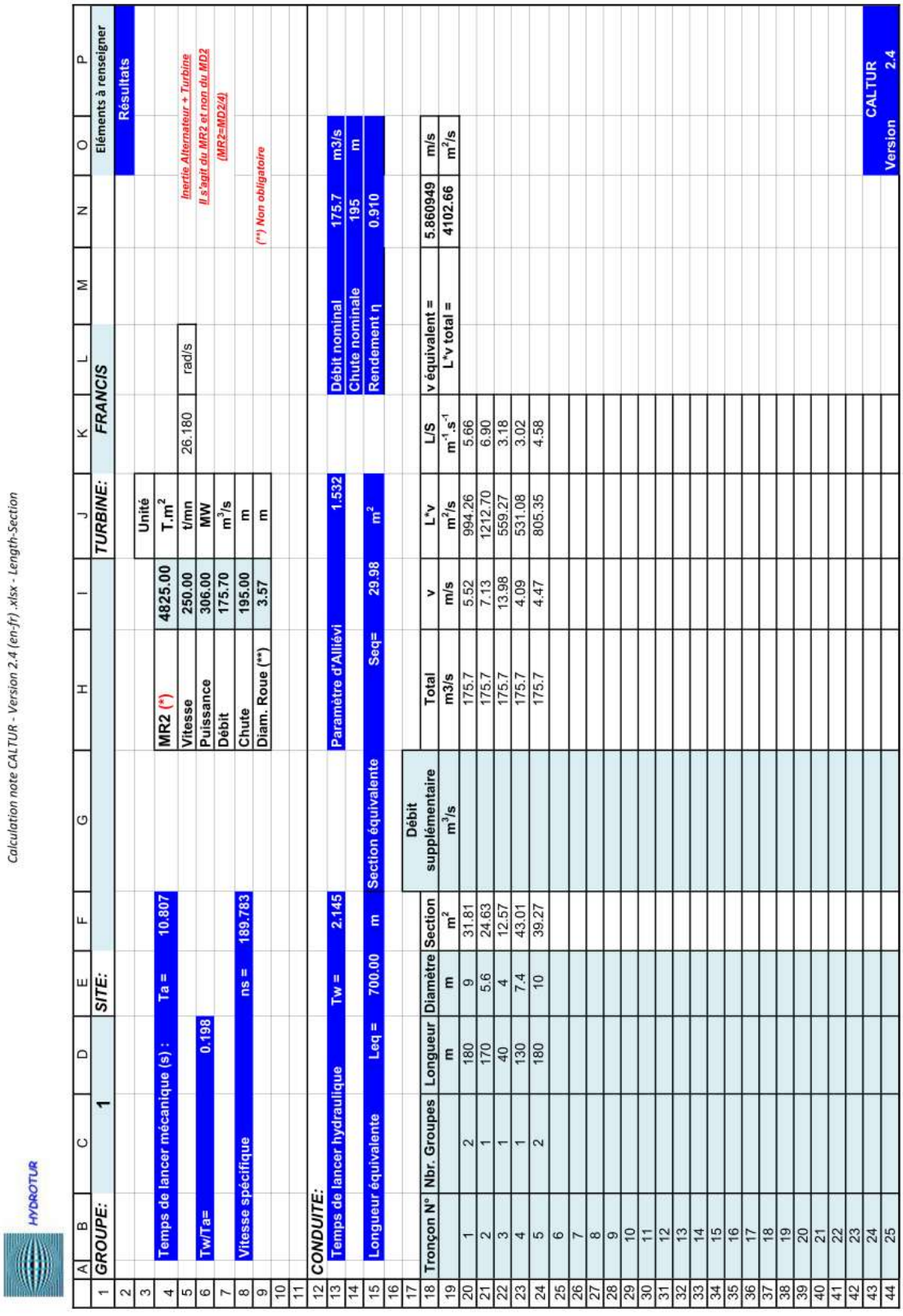


Figure 219 : Lignes d'iso-ouverture de la colline analytique KB1

ANNEXE

A. ELEMENTS DE CALCUL DANS LE CIRCUIT HYDRAULIQUE – CALTUR EXCEL



Calculation note CALTUR - Version 2.4 (en-fr) .xlsx - Length-Section

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1		GROUPE:		1	SITE:					TURBINE:	FRANCIS				Eléments à renseigner	Résultats
2																
3											Unité					
4		Temps de lancer mécanique (s) :		Ta =	10.807			MR2 (*)	4825.00	T.m²						
5								Vitesse	250.00	t/mn	26.180	rad/s			Inertie Alternateur + Turbine	
6		Tw/Ta=		0.198				Puissance	306.00	MW					Il s'agit du MR2 et non du MD2	
7								Débit	175.70	m³/s					(MR2=MD2/4)	
8		Vitesse spécifique		ns =	189.783			Chute	195.00	m						
9								Diam. Roue (**)	3.57	m					(**) Non obligatoire	
10																
11																
12		CONDUITE:														
13		Temps de lancer hydraulique		Tw =	2.145			Paramètre d'Allièvi		1.532		Débit nominal	175.7	m3/s		
14												Chute nominale	195	m		
15		Longueur équivalente		Leq =	700.00	m		Section équivalente	Seq=	29.98	m²	Rendement η	0.910			
16																
17							Débit									
18		Tronçon N°	Nbr. Groupes	Longueur	Diamètre	Section	supplémentaire	Total	v	L*v	L/S	v équivalent =		5.860949	m/s	
19				m	m	m²	m³/s	m3/s	m/s	m²/s	m⁻¹.s⁻¹	L*v total =		4102.66	m²/s	
20		1	2	180	9	31.81		175.7	5.52	994.26	5.66					
21		2	1	170	5.6	24.63		175.7	7.13	1212.70	6.90					
22		3	1	40	4	12.57		175.7	13.98	559.27	3.18					
23		4	1	130	7.4	43.01		175.7	4.09	531.08	3.02					
24		5	2	180	10	39.27		175.7	4.47	805.35	4.58					
25		6														
26		7														
27		8														
28		9														
29		10														
30		11														
31		12														
32		13														
33		14														
34		15														
35		16														
36		17														
37		18														
38		19														
39		20														
40		21														
41		22														
42		23														
43		24														
44		25														

HYDROTUR

CALTUR Version 2.4

09/09/2025

1/1

Figure 220 : Note de calcul en/fr CALTUR.xlsx

B. RÉPARTITEUR DE JETS

B.1 Schéma du module REPARTITEUR

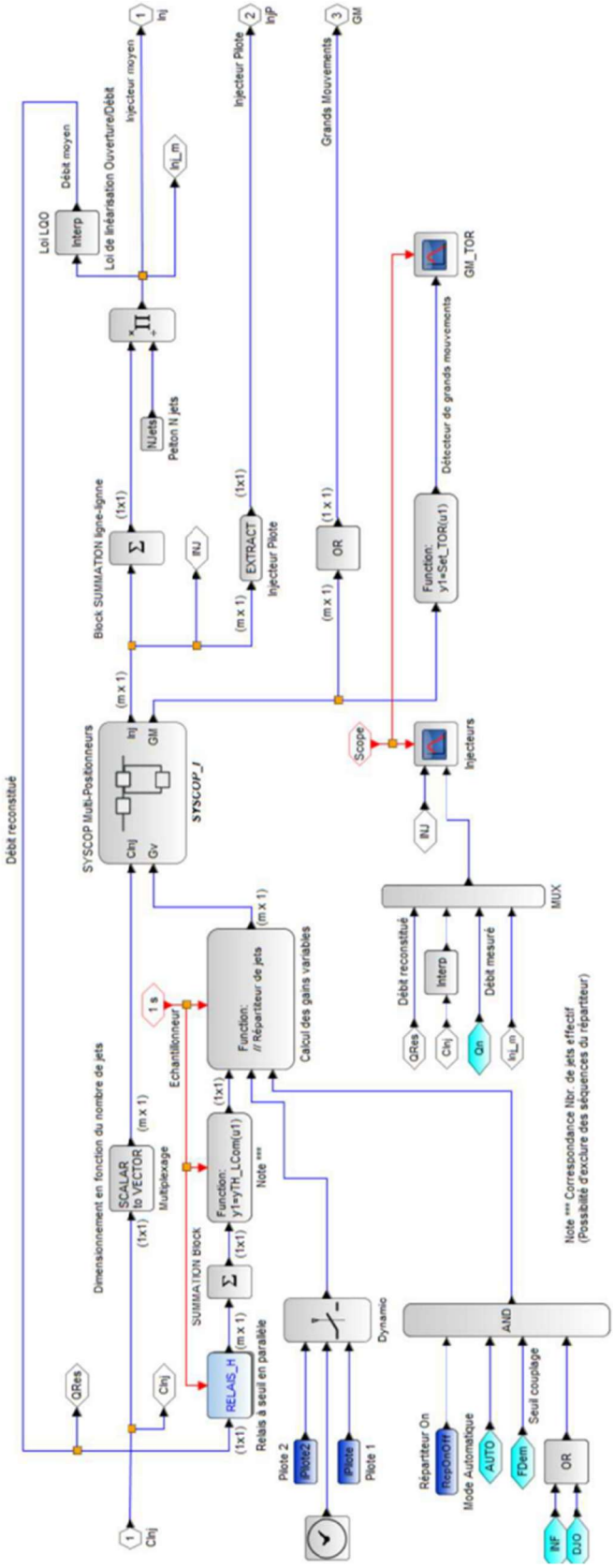


Figure 221 : Schéma du module REPARTITEUR

B.2 Étude économique d'un répartiteur de jets à l'usine de San Colombano (Italie)

Ce chapitre consolide, par un exemple, l'étude présentée au **§ 5.2**

La *Figure 222* indique la statistique moyenne mensuelle d'un groupe PELTON 5 jets exploité sur 7 années consécutives, à l'usine de San Colombano en Italie.

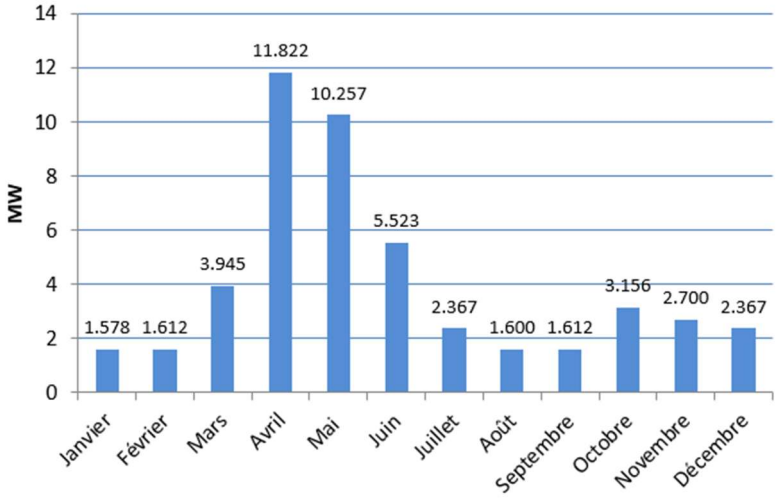


Figure 222 : Moyennes des puissances turbinées sur 7 années

Le groupe fonctionne sous une chute de 382 m et fournit une puissance nominale de 16 MW avec un débit nominal de 4.787 m³/s.

La puissance fournie par une aiguille est donc $\frac{16MW}{5}=3.2MW$

La *Figure 224* indique les courbes de rendement de la machine en fonction de la puissance et des injecteurs à engager dans les séquences.

Au mois de Janvier, le groupe est turbiné à la puissance de 1.58 MW.

Le rendement pour un fonctionnement à 1 jet est $\eta_1 = 87\%$, contre un rendement $\eta_5 = 78\%$ à la même puissance avec un fonctionnement à 5 jets.

Soit un débit optimisé $Q_{n1} = 0.484 m^3 s^{-1}$ contre $Q_{n5} = 0.54 m^3 s^{-1}$, ou bien une économie en eau égale environ à $(0.54 m^3 s^{-1} - 0.484 m^3 s^{-1}) * 3600 s * 24 h * 30 j \approx 145000 m^3$ pour le mois de Janvier.

On reporte sur la *Figure 223* le gain obtenu sur le débit moyen turbiné par mois, et on porte le(s) volume(s) d'eau économisé(s), en conséquence de l'engagement ou non (5 injecteurs en service) du répartiteur de jets.

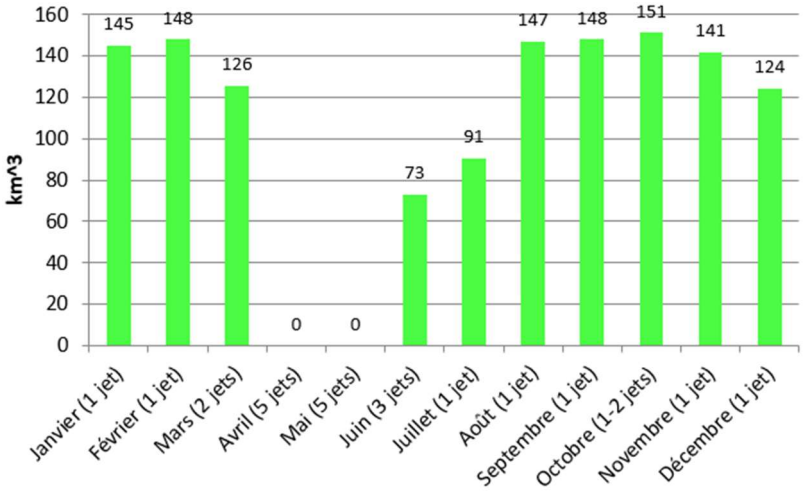


Figure 223 : Gains en volume par an

Durant la période printanière (fonte des neiges), le groupe est turbiné aux environs de la puissance nominale, donc à 5 jets, et il n'y a bien sûr pas d'économie en eau dans ce créneau.

Le volume d'eau économisé par an serait donc 1 294 000 m³, soit :

$$\frac{1\,294000\ m^3}{2500\ m^3} \approx 517$$ **Piscines olympiques**

$$1294000\ m^3 \text{ x } 4\ € \approx 5.2\ M€$$ **Gain économique**

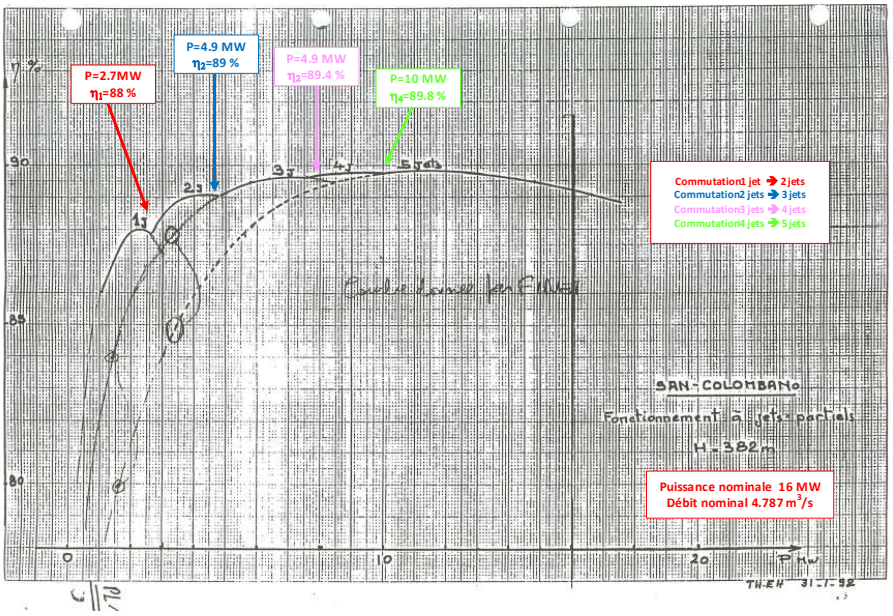


Figure 224 : Courbes de rendement de l'usine de San Colombano (PELTON 5 jets)

Mois	Puissances turbinées (MW)	Débit optimisé (m³/s)	Débit 5 jets (m³/s)	Gain en volume.mois / an (m³)
Janvier	1.578	0.484	0.540	145 000
Février	1.612	0.494	0.551	148 000
Mars	3.945	1.183	1.231	126 000
Avril	11.822	3.513	3.513	0
Mai	10.257	3.048	3.048	0
Juin	5.523	1.647	1.675	73 000
Juillet	2.367	0.726	0.761	91 000
Août	1.600	0.491	0.547	147 000
Septembre	1.612	0.494	0.551	148 000
Octobre	3.156	0.962	1.021	151 000
Novembre	2.700	0.819	0.873	141 000
Décembre	2.367	0.718	0.766	124 000
			Total	1294 000

Figure 225 : Données statistiques d'exploitation annuelle

B.3 Calcul des efforts sur une roue PELTON - Axe vertical

La feuille de calcul **PeltEff.xlsx** PeltEff.xlsx, présentée ci-dessous, est disponible dans le répertoire **HydroSim\TURBINES\PELTON\Utilitaires**

HYDROTUR - HydroSim

PeltEff.xlsx

HYDROTUR

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1			Calcul des efforts sur une roue PELTON 5 jets - Axe vertical						
2	Données d'entrée					Ouvertures (%)			
3	n	5	Nombre de jets	Injecteur 1	Injecteur 2	Injecteur 3	Injecteur 4	Injecteur 5	
4	Hn	1034	Chute nominale (m)	60	0	60	0	60	
5	Qn	21	Débit nominal (m^3/s)	o_1	o_2	o_3	o_4	o_5	o_6
6	Vn	428.6	Vitesse nominale (tr/mn)						
7	D	3.1	Diamètre de la roue (m)						
8	g	9.81	Accélération de la pesanteur (m/s^2)	Force résultante ==>			226.964 kN		
9	ro	1000	Masse volumique de l'eau (m^3/s)						
10									
11			Constante calculée	K=	612059.667				
12									
13				q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6
14			Débit par injecteur (m^3/s)	2.520	0.000	2.520	0.000	2.520	
15			Débit total (m^3/s)		qt	7.560			
16									
17				f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
18			Force Fi exercée sur les augets (kN)	367.236	0.000	367.236	0.000	367.236	
19			Fix : Projection Fi en X (kN)	367.236	0.000	-297.100	0.000	113.482	
20			Fiy : Projection Fi en Y (kN)	0.000	0.000	215.856	0.000	-349.262	
21									
22			Fx : Module en X (kN)	183.618	Fx				
23			Fy : Module en Y (kN)	-133.406	Fy				

Figure 226 : Feuille Excel de calcul d'effort PeltEff.xlsx

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Support technique du projet HYDROTUR 6
Figure 2 : Liste des modèles et algorithmes disponibles 10
Figure 3 : Exemple de Blocs Fonctionnels – Schéma unifilaire du circuit FR5 avec Collines machine 11
Figure 4 : Structure de paramétrage des simulateurs 12
Figure 5 : Fenêtre "HydroSim RUNNER" au lancement d'un fichier "SCE" 12
Figure 6 : Menu HydroStab - Sélection d'une méthode d'optimisation 13
Figure 7 : Fichier HydroSim\demos\FRANCIS\FR2\Standard\0 - Etudes de stabilité\Déclenchement - Pn= 90%\03_Francis -- FR2c - Declenchement - Pn= 90% - PosMini=0.00.scg 14
Figure 8: Fichier HydroSim\demos\FRANCIS\FR2\Standard\0 - Etudes de stabilité\Déclenchement - Pn= 90%\02_Francis -- FR2c - Declenchement - Pn= 90% - PosMini=0.01.scg 14
Figure 9: Fichier HydroSim\demos\FRANCIS\FR2\Standard\0 - Etudes de stabilité\Déclenchement - Pn= 90%\01_Francis -- FR2c - Declenchement - Pn= 90% - PosMini=0.02.scg 14
Figure 10 : Sélection du solver RUNGE-KUTTA sous XCOS 15
Figure 11 : TSim : Réglage du temps de simulation 16
Figure 12 : Durée de vie des oscilloscopes numériques 16
Figure 13 : Boîte de réglage des paramètres de simulation 16
Figure 14 : Affichage de la durée de la simulation dans la console Scilab 17
Figure 15 : Loi Débit/Ouverture par défaut $Q=O^{nq}$ 17
Figure 16 : Bloc "Turbine+Adduction" TURBADDUC du circuit FR2 18
Figure 17 : Calculateur HydroStab - Calcul des paramètres PID en boucle ouverte 19
Figure 18 : Marge de module dans le plan de Nyquist 19
Figure 19 : Méthode de réglage du PID Vitesse par la marge de module dans le plan de Nyquist 19
Figure 20 : Réglage du PID Vitesse par la méthode de Ziegler-Nichols 19
Figure 21 : Récupération des données de HydroStab dans un répertoire HydroSim 20
Figure 22 : Composants et profil en long d'une petite centrale hydraulique 20
Figure 23 : Calcul préliminaire à l'étude de stabilité d'un groupe hydraulique 21
Figure 24 : Exemple de plaque signalétique accolée à la turbine 23
Figure 25 : Fichier HydroStab dans la simulation de la machine FR2 24
Figure 26 : Récupération des données HydroStab dans HydroSim 24
Figure 27 : Circuit « Turbine + Adduction » de l'algorithme FR5 avec Colline machine et Interpolateur 25
Figure 28 : Exemple d'utilisation du paramètre CourseSM=240mm 26
Figure 29 : Évaluation de l'ouverture de marche à vide Omav lors d'un déclenchement DE 26
Figure 30 : Évaluation du paramètre de marche à vide Omav par interpolation linéaire sur la loi Puissance/Ouverture (bLOQ=0) 27
Figure 31 : Régulateur de vitesse pour machine Francis – Circuit Francis FR2➔REGFRA 28
Figure 32 : Bloc LimINT de conditionnement de l'action intégrale 29
Figure 33 : Descripteur du PID Vitesse avec statisme à l'Ouverture / Puissance / Débit 30
Figure 34 : Dérivateur accéléro-tachymétrique dans les blocs REGN 30
Figure 35 : Statisme permanent Bp à l'ouverture 31
Figure 36 : Vérification du statisme à l'ouverture (Circuit FR2) 31

Figure 37 : Statisme Bp2 dans le module CC de consignation de charge 32
Figure 38 : Vérification du statisme à la puissance (circuit FR2) 32
Figure 39 : Filtrage passe-bas tachymétrique 33
Figure 40 : Déclenchement du groupe avec arrêt groupe et freinage (MoDECL=0) 34
Figure 41 : Déclenchement du groupe avec retour en marche à vide (MoDECL=1) et action du relais de déclenchement RDECL 34
Figure 42 : Déclenchement du groupe avec retour en marche à vide (MoDECL=1) sans relais de déclenchement RDECL 34
Figure 43 : Séquenceur de démarrage Bang 35
Figure 44 : Démarrage type Bang 35
Figure 45 : Démarrage sur une rampe de vitesse 35
Figure 46 : Implantation de la variable Riso et Séquence de passage en mode réseau isolé (bloc Système) 36
Figure 47 : Schéma simplifié de la vitesse du groupe turbo-alternateur (block Reseau) 36
Figure 48 : Implantation du mode réseau isolé dans le bloc Reseau 37
Figure 49 : Mode d'exploitation du groupe en charge (module CC) 38
Figure 50 : Commutateurs d'asservissement à la Puissance, à l'Ouverture, ou au Débit dans le bloc CC 38
Figure 51 : SetPoint : Accès aux principaux paramètres de consignation du groupe hydraulique 39
Figure 52 : Boîte Rampe du consignateur de vitesse (bloc CVIT) 40
Figure 53 : Précontrainte de la consigne de vitesse au démarrage sur une rampe de vitesse (si Modem=1) 41
Figure 54 : Perturbations sur la consigne de vitesse – Module CVIT 41
Figure 55 : Réglage des échelons de consigne de vitesse sur le pertubographe – Module CVIT 41
Figure 56 : Instanciation d'une séquence de démarrage de type Bang, dans le module des Limiteurs d'ouverture (Bloc LO) 42
Figure 57 : Séquenceur de l'interpolateur Bang au démarrage (Modem=0) 42
Figure 58 : Détecteur "Fin Séquence de démarrage" 42
Figure 59 : Prise en compte de la consigne de charge dans le bloc REGN 43
Figure 60 : Boîte Rampe du consignateur de charge dans le module CC 43
Figure 61 : Principe de modélisation du réseau électrique – Coefficient d'autoréglage du réseau 44
Figure 62 : Réglage du générateur GeneBF dans HydroSim 44
Figure 63 : Principe général du perturbographe Gene_BF dans le module « Réseau » 45
Figure 64 : Composants du générateur GeneBF 46
Figure 65 : Réglage des échelons de charge sur les pertubographes n°1 et n°2 46
Figure 66 : Exemple d'utilisation du générateur GeneBF en mode « Échelons » sur la consigne de charge 46
Figure 67 : Paramétrisation du générateur sinusoïdal synchronisé 47
Figure 68 : Paramétrisation du composant DiracSync 47
Figure 69 : Aperçu du générateur de fonction Gene_BF avant exécution 48
Figure 70 : Paramètres du programme de test GeneBF – Extrait d'un fichier cfg 49
Figure 71 : Réponse à un échelon de charge 49
Figure 72 : Poursuite d'une sinusoïde 50
Figure 73 : Réponse de la régulation de vitesse à un peigne de Dirac sur la mesure de vitesse (réseau interconnecté) 50
Figure 74 : Réponse du régulateur FR2 à un peigne de Dirac (10%) sur la charge (réseau interconnecté) 51
Figure 75 : Perturbateur de consigne n°3 de Charge/Débit/Puissance dans le module CC 52
Figure 76 : Prise en compte de la loi de rendement Rend dans le module principal FR2 53

Figure 77 : Prise en compte du rendement dans le module Puissance du circuit FR2 53
Figure 78 : Exemple de loi de rendement dans le circuit FR2 (Fichier FR2 - Lois.xlsx) 53
Figure 79 : Loi de rendement est définie par défaut dans le fichier « VariablesGlobales.sce » 54
Figure 80 : Loi de rendement définie dans le fichier HydroSim\demos\KAPLAN\KB1\Standard\KB1.xls 54
Figure 81 : Application du couple de friction dans le module Reseau 55
Figure 82 : Mode Couples de Friction et de Freinage CFRIC 55
Figure 83 : Interpolateur dans le module CFRIC 55
Figure 84 : Déclenchement du groupe et arrêt machine (MoDECL=0) 56
Figure 85 : Mécanisme de resynchronisation de l'intégrateur vitesse 56
Figure 86 : Remise à 0 impulsionnelle de l'intégrateur vitesse sur réception du signal Sync 57
Figure 87 : Diagramme du Relais de déclenchement RDECL 57
Figure 88 : Table de vérité de la bascule RS 58
Figure 89 : Hystérésis du relais de survitesse dans le module RDECL 58
Figure 90 : Détecteur de front - Armement de la bascule RDECL 58
Figure 91 : Action du relais de déclenchement RDECL sur le pré-positionnement de l'organe de réglage (bloc LINE) 58
Figure 92 : Module Système - Relais de resynchronisation Sync1 59
Figure 93 : Relais de survitesse - KB 60
Figure 94 : Relais de sous-vitesse – KB 60
Figure 95 : Déclencheur Sync1 avec datation TBusy 60
Figure 96 : Temporisation ré-armable de détection de retour en régime stabilité du réseau électrique 60
Figure 97 : Détecteur de stabilité du réseau électrique – Module STABRES 60
Figure 98 : Détecteur de fin de temporisation - Retour en réseau stable – Module 0-Cross 60
Figure 99 : Conditions d'enclenchement du relais vitesse pour le contrôle de l'intégrateur vitesse - KB 61
Figure 100 : Grafcet simplifié de resynchronisation Sync1 61
Figure 101 : Graphe de resynchronisation KB 62
Figure 102 : PID vitesse - Remise à 0 de l'intégrateur INT 62
Figure 103 : Transitoire Kaplan 75% PW - Échelon 10% 62
Figure 104 : Synchronisateur Sync2 - Accostage de la rampe de charge 63
Figure 105 : Visualisation du relais BusyCC dan le module Reseau 63
Figure 106 : Programmation de la détection d'un front descendant 63
Figure 107 : Remise à 0 de l'intégrateur vitesse sur resynchronisation Sync2 64
Figure 108 : Rampe de charge KB1 - Pn=50% - Rampe 75% - bSync2=1 64
Figure 109 : Rampe de charge KB1 - Pn=50% - Rampe 75% - bSync2=0 64
Figure 110 : Schéma oléohydraulique simplifié de commande de l'organe de réglage – Système copiant [10] 65
Figure 111 : Bloc de positionnement du servomoteur SYSCOP – Vannage 65
Figure 112 : Bloc de positionnement du servomoteur SYSCOP – Injecteur 66
Figure 113 : Adaptation du Gain Variable dans les turbines PELTON - Axe vertical 66
Figure 114 : Module SYSCOP d'asservissement du système copiant du vannage dans HydroSim 67
Figure 115 : Calcul des temps de manœuvre à la fermeture sur la loi LF dans les fichiers CTX 67
Figure 116 : Principe du paramétrage des lois de fermeture multipente 68

Figure 117 : Loi multi-pentes dans la feuille TM du fichier projet HydroSim\FRANCIS\FR2\Standard\FR2c.xls 68
Figure 118 : Loi de manœuvre par défaut si la feuille TM est absente 68
Figure 119 : Exemple de loi de fermeture à plusieurs pentes - Instruction de traçage « Plot LF demo » 69
Figure 120 : Détecteur de grands mouvements Vannage ou Injecteurs – Module SYSCOP 69
Figure 121 : Bloc de conditionnement de l'intégrateur vitesse dans le module CI-REGN 70
Figure 122 : Seuil grand mouvement du vannage GMV (Turbine Kaplan) 70
Figure 123 : Prépositionnement du Vannage (ou Injecteur) lors d'un déclenchement du groupe avec Retour en marche à vide (module LINE) 71
Figure 124 : Amortissement des oscillations conduite avec PosMini 71
Figure 125 : Mode Manuel dans les blocs SYSCOP (MANU=1) 72
Figure 126 : Paramètres de la boite STEP2 dans un module SYSCOP 72
Figure 127 : Vérification d'une loi de fermeture LF à 4 pentes en mode manuel (MANU=1) 72
Figure 128 : Système copiant des déflecteurs SYSCOPD 73
Figure 129 : Action des temps de manœuvre sur les systèmes copiants 73
Figure 130 : Mode manuel Déflecteurs dans une turbine PELTON 74
Figure 131 : Effet de coupure des déflecteurs sur une machine PELTON lors d'un déclenchement machine à pleine charge 74
Figure 132 : Loi LoiDefl d'anticipation de fermeture des déflecteurs (Bloc SYSCOPD) 75
Figure 133 : Loi analytique de suivi du déflecteur 75
Figure 134 : Échelon 10% à P=75% - Évolution et anticipation du déflecteur PELTON 76
Figure 135 : Correction de Puissance par le Déflecteur - Bloc PU_DEFL 76
Figure 136 : Loi de conditionnement de l'intégrateur vitesse par le déflecteur 77
Figure 137 : Algorithme de l'Estimateur K_Def pour déflecteur - Machines PELTON 77
Figure 138 : Évaluation du coefficient K_Def de pénétration du déflecteur dans le jet PELTON 78
Figure 139 : K_Def - Échelons 10% à Pn=75% 78
Figure 140 : K_Def Déclenchement avec retour Marche à Vide 78
Figure 141 : Module Puissance - Turbines PELTON 78
Figure 142 : Système copiant des Pales (bloc SYSCOPP) 79
Figure 143 : Détecteur de grand mouvement GMP des pales (bloc SYSCOPP) 79
Figure 144 : Fonctionnement en mode Positionneur des Pales - Module SYSCOPP 80
Figure 145 : Vérification des temps de manœuvre du vannage et des pales en mode manuel MANU=1 80
Figure 146 : Programmation des temps de manœuvre des Pales dans le fichier HydroSim\demos\KAPLAN\KB1\Standard\KB1c.xls 81
Figure 147 : Pré-positionnements des pales - Module PREPAL 81
Figure 148 : Coefficient KDecP de déconjugaison des pales 82
Figure 149 : Exemple de relevé de linéarités sur un site hydro-électrique (fichier HydroSim\demos\FRANCIS\FR2\K2_c\DATA K2.xls) 82
Figure 150 : Saisie des relevés de linéarisation dans le fichier HydroSim\demos\FRANCIS\FR2\K2_c\K2c.xls 83
Figure 151 : Variables globales utilisées dans les lois de linéarisation 83
Figure 152 : Loi de linéarisation LPO Puissance/Ouverture dans le circuit FR2 – Module LINE 84
Figure 153 : Loi de linéarisation LPO Puissance/Ouverture dans le circuit FR2 – Consignateur de charge - Module CC 84
Figure 154 : Calcul du débit initial Qini dans le fichier FR2.CTX 85
Figure 155 : Tracé de la loi LQO sous Scilab 85
Figure 156 : Utilisation de la variable calculée Qini dans le circuit FR2 Module TurbAdduc 86

Figure 157 : Actions de l'interrupteur bLOQ dans le module TurbAdduc de FR2 86
Figure 158 : Affichage des lois dans la console Scilab si Display_LINE=1 86
Figure 159 : Circuit différentiel en Débit 87
Figure 160 : Circuit différentiel en Chute 87
Figure 161 : Initialisation du filtre Chute 87
Figure 162 : Asservissement de débit dans le module CC 88
Figure 163 : Loi LQP - Module CC 88
Figure 164 : Tracé de la loi LQP sous Scilab 89
Figure 165 : Calcul de la chute initiale H0 dans le module Marteau d'eau/TurbAdduc du circuit FR5 89
Figure 166 : Calcul de la chute initiale H0 dans le fichier FR5.CTX 89
Figure 167 : Tracé de la loi LHO sous Scilab 90
Figure 168 : Évaluation des pertes de charge dynamiques dans le circuit TURBADDUC du modèle FR2 90
Figure 169 : Évaluation des pertes de charge dynamiques dans le circuit TURBADDUC-Marteau d'eau du modèle FR5 91
Figure 170 : Calcul du coefficient de perte de charge dans le contexte FR2.CTX du circuit FR2 92
Figure 171 : Formule de ColeBrook-White - Évaluation du coefficient de perte de charge 92
Figure 172 : Calcul du coefficient de frottement de Darcy dans la fonction dans la routine « Colebrook.sci » 92
Figure 173 : Traçage de l'instruction de Colebrook-White 93
Figure 174 : Instructions "Plot" dans la console Scilab 94
Figure 175 : Exemple de tracé de loi de linéarisation - Instruction "PlotLINE" 95
Figure 176 : Exemple de tracé de loi des temps de manœuvre Instruction "PlotLF" 95
Figure 177 : Exemple de tracé de loi de rendement - Instruction "PlotRend" 95
Figure 178 : Exemple de tracé de colline - Instruction "PlotHill demo" 95
Figure 179 : Utilisation de la fonction HydroSim 'Interpoler' 96
Figure 180 : Loi de rendement par défaut (Instruction de traçage : PlotRend FR2) 96
Figure 181 : Répartiteur de jet – Prise de charge 90% (Fichier (HydroSim\demos\PELTON\Pelt6\Standard\0 - Etudes Stabilité\Démarrage + 90% Charge Avec Répartiteur)) 97
Figure 182 : Répartiteur de jets pour machine PELTON (*voir aussi B.1*) 98
Figure 183 : Conditions de validation et d'activation du répartiteur de jet (extrait du module REPARTITEUR) 98
Figure 184 : Séquence de démarrage d'une turbine PELTON 6 jets avec injection pilote sur l'injecteur n°3 99
Figure 185 : Méthode de changement de l'injecteur pilote - Groupe en marche (extrait schéma REPARTITEUR) 99
Figure 186 : Exemple de programmation des seuils de commutation de jets – Fichier « HydroSim\demos\PELTON\Pelt6\StandardPelt6c.xls» 100
Figure 187 : Courbes de rendement d'une PELTON 4 jets 100
Figure 188 : Principe du relais multiple RELAIS_H. 100
Figure 189 : Programme de test du composant RELAIS_H pour une PELTON 6 jets 101
Figure 190 : Seuils de commutation des jets Injecteurs - Hystérésis réglés à TL_LCom=TH_LCom-0.001 par défaut 101
Figure 191 : Boite de programmation du composant RELAIS_H 101
Figure 192 : Détection d'efforts radiaux sur une Pelton 5 jets 102
Figure 193 : Sélecteur de jets PELTON 103
Figure 194 : Multiplication de la consigne Injecteur par un gain variable - Extrait schéma SYSCOP Injecteur 103
Figure 195 : Commutation d'injecteurs d'une roue PELTON 103

Figure 196 : Tableau des gains variables 104
Figure 197 : Principe du commutateur de jets pour turbine PELTON 6 injecteurs – Prise de charge à 100% PU 105
Figure 198 : Principe de modélisation avec les collines caractéristiques 107
Figure 199 : Fonctions Collines dans les modules Xcos TurbAdduc FR4-FR5-KB1 107
Figure 200 : Échantillonnage des interpolateurs - Colline Machine 108
Figure 201 : Fonction « scifunc_block_m » dans la palette standard Xcos 108
Figure 202 : Boîte fonctionnelle de l'interpolateur Intercol5c – circuit FR5 (Boîte 1/2) 108
Figure 203 : Démonstrateur d'un interpolateur sur un colline machine 109
Figure 204 : Colline pour Machine FRANCIS Type FR4 – Interpolateur Intercol4.sci (Boîte 2/2) 110
Figure 205 : Déclaration et insertion de la colline machine FR4 dans le fichier de paramétrisation XLS 110
Figure 206 : Diagnostic de chargement d'une colline FR4 dans la console Scilab 111
Figure 207 : Colline par défaut Colline4.xls 111
Figure 208 : Format des collines FR4 111
Figure 209 : Classement extrait du fichier Colline4.txt 112
Figure 210 : Tracé de la colline FR4 dans la console Scilab 112
Figure 211 : Colline pour Machine FRANCIS Type FR5 – Interpolateur Intercol5c.sci (Boîte 2/2) 113
Figure 212 : Déclaration et insertion de la colline machine FR5 dans le fichier de paramétrisation XLS 113
Figure 213 : Diagnostic de chargement d'une colline FR5 dans la console Scilab 114
Figure 214 : Colline par défaut Colline5.xls 114
Figure 215 : Format des collines FR5 114
Figure 216 : Classement extrait du fichier Colline5.txt 115
Figure 217 : Tracé de la colline FR5 dans la console Scilab 115
Figure 218 : Colline pour Machine Kaplan KB1 – Interpolateur IntercolKB (Boîte 2/2) 116
Figure 219 : Lignes d'iso-ouverture de la colline analytique KB1 116
Figure 220 : Note de calcul en/fr CALTUR.xlsx 117
Figure 221 : Schéma du module REPARTITEUR 118
Figure 222 : Moyennes des puissances turbinées sur 7 années 119
Figure 223 : Gains en volume par an 119
Figure 224 : Courbes de rendement de l'usine de San Colombano (PELTON 5 jets) 120
Figure 225 : Données statistiques d'exploitation annuelle 120
Figure 226 : Feuille Excel de calcul d'effort PeltEff.xlsx 121

Notes personnelles