

# TABLE DES MATIERES

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>THÉMATIQUE.....</b>	<b>1</b>
2.1	Thématique générale .....	1
2.2	Thématique chez Hydro-Exploitation SA.....	2
<b>3</b>	<b>MODÈLES SIMPLES .....</b>	<b>3</b>
3.1	Modèle de conduite.....	3
3.2	Modèle de pointeau .....	4
3.3	Représentation graphique des modèles.....	4
3.3.1	<i>Section du jet .....</i>	<i>5</i>
3.3.2	<i>Pertes de charge.....</i>	<i>5</i>
<b>4</b>	<b>AMÉLIORATION DES MODÈLES .....</b>	<b>6</b>
4.1	Bassin.....	6
4.1.1	<i>Parallélépipède rectangle .....</i>	<i>7</i>
4.1.2	<i>Pyramide tronquée à base rectangulaire.....</i>	<i>7</i>
4.1.3	<i>Cône tronqué .....</i>	<i>8</i>
4.2	Chambre de mise en charge.....	8
4.3	Actionneur/Pointeau.....	9
4.3.1	<i>Fonctionnement .....</i>	<i>10</i>
4.3.2	<i>Modèle de la vanne proportionnelle.....</i>	<i>10</i>
4.3.3	<i>Modèle du piston.....</i>	<i>11</i>

<b>5</b>	<b>1 ÉTAGE</b>	<b>15</b>
5.1	Système « position »	16
5.1.1	Régulation	17
5.1.2	Résultats	20
5.1.3	Variations des caractéristique de l'actionneur	21
5.2	Système « niveau »	22
5.2.1	Détermination du système	23
5.2.2	Régulation gain constant, critère symétrique	25
5.2.3	Résultat pour gain constant selon critère symétrique, régulateur PI	27
5.2.4	Régulation gain constant, filtre objectif	30
5.2.5	Résultat pour gain constant selon filtre objectif, régulateur PID	31
<b>6</b>	<b>CASCADE</b>	<b>34</b>
6.1	Résultats d'une cascade de 2 étages	35
6.2	Cascade de 3 étages	37
<b>7</b>	<b>PUISSANCE DE L'INSTALLATION ÉTAGÉE</b>	<b>37</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>41</b>
<b>9</b>	<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>41</b>
<b>10</b>	<b>ANNEXES</b>	<b>42</b>
<b>11</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>42</b>

# 1 INTRODUCTION

Ce travail a pour but la modélisation et la régulation d'une installation hydroélectrique de 3 étages. Chaque étage contient deux régulateurs, le premier pour le positionnement du pointeau et le second pour le niveau de l'eau dans la chambre de mise en charge. Le dimensionnement de ces derniers est réalisé par comparaison avec un filtre objectif et avec la méthode du critère symétrique. Le travail doit permettre de savoir si une communication entre les étages est nécessaire pour éviter le déversement ou le dénoyage des chambres de mise en charge. Les contraintes sur l'ouverture et la fermeture des pointeaux sont pris en compte, tout comme les différents retards dans l'installation.

## 2 THÉMATIQUE

### 2.1 Thématique générale

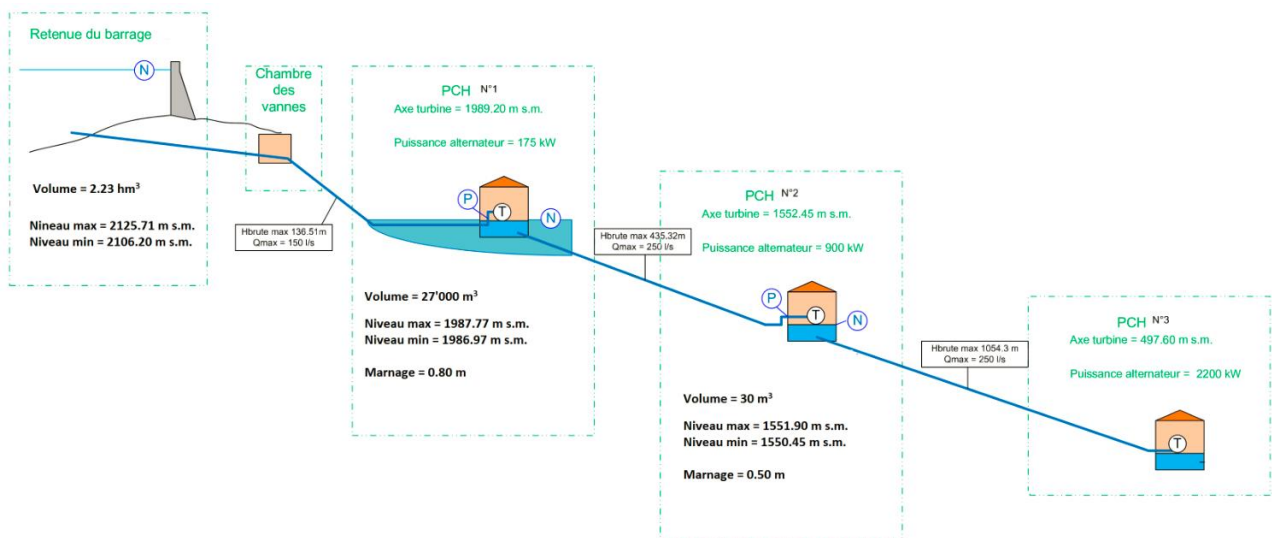
De nouvelles énergies renouvelables (NER) comme le solaire et l'éolien sont de plus en plus au goût du jour. Ces énergies produisent de manière intermittente. En effet, elles sont directement liées aux conditions météorologiques. Il faut, par exemple, suffisamment de vent pour produire de l'électricité avec une éolienne. De plus, l'énergie électrique est difficilement stockable à grande échelle. Les jours de grands vents ou de soleil intense, la production apparaît trop importante. On peut alors être confronté à un surplus ou à un manque d'énergie que l'hydroélectrique est capable de combler, contrairement aux productions de ruban. La mise en fonction d'une centrale hydroélectrique ne nécessite qu'un laps de temps relativement court (de l'ordre de 15 minutes), alors que les productions en ruban sont des systèmes qui produisent en continu et demande un temps élevé de démarrage et de mise hors service (de plusieurs heures à quelques jours).

De plus l'hydroélectrique, de par sa flexibilité, comparée aux NER, permet de faire du service système. Les NER ont pour conséquences un prix volatile de l'électricité, avec une moyenne basse. Il est donc primordial d'effectuer un contrôle optimal des équipements pour pouvoir rester concurrentiel et il est nécessaire d'optimiser la planification de production et d'exploiter les installations dans les plages de rendement maximum. La gestion d'installations hydroélectriques à plusieurs étages peut être complexe : Il faut synchroniser les débits de chaque étage pour déverser le minimum d'eau. L'eau étant la matière première du système, il faut éviter d'en perdre le plus possible. Si cette eau est utilisée comme eau potable ou dans le domaine agricole, il faut garder en tête de pouvoir garantir un approvisionnement des consommateurs, ce qui passe par la gestion de l'eau disponible dans les bassins. Il faut donc mettre en place des systèmes d'information et de communication pour arriver à atteindre ces buts.

## 2.2 Thématique chez Hydro-Exploitation SA

Hydro-Exploitation SA gère certaines installations qui se présentent sous forme étagée. On entend par étagée le fait que l'eau est turbinée plusieurs fois à la suite, sur une distance de quelques centaines de mètres. On peut alors assimiler ces équipements à du fil de l'eau, car les aménagements inférieurs dépendent de ceux situés en amont. Nous nous concentrons sur des installations avec des conduites forcées entre les divers bassins. Cependant, on parle aussi d'installations étagées sur des rivières, ou fleuves, comme le Rhône, qui sont distantes de plusieurs kilomètres. On remarque dès lors qu'il est commun de retrouver ce genre d'équipements dans notre région et qu'Hydro-Exploitation SA est appelé à en gérer plus d'une.

C'est essentiellement la configuration du terrain qui privilégie une installation étagée, mais des contraintes mécaniques favorisent aussi celles-ci au contraire d'une seule grosse centrale en aval.



Un des travaux d'Hydro-Exploitation SA est de planifier sa production. La vue sur la planification est limitée dans le temps avec notamment les prévisions météo et le prix de l'électricité sur le marché. Cette entreprise a la chance d'avoir directement le contrôle de ces aménagements, sans les contraintes engendrées par une société les commandant à distance. Le but pour l'entreprise est d'exploiter au mieux ces centrales de production, au meilleur rendement, avec le moins de pertes d'eau possible, pour maximiser les revenus financiers.

### 3 MODÈLES SIMPLES

Ce chapitre reprend des données exposées lors d'un travail préparatoire (voir Projet de semestre 2016, Filière Energie et Techniques Environnementales, Orientation Smart Grid, Optimisation d'une installation hydroélectrique étagée, Maxime Borloz).

Pour rappel, un modèle sert à représenter le mieux possible, les caractéristiques d'un élément physique. Un modèle est caractérisé par des entrées et des sorties, avec une certaine équation mathématique entre celles-ci.

Dans cette première approche, différents modèles ont été caractérisés. 2 modèles ont été repris tel-quels et ils sont exposés ci-dessous. D'autres seront améliorés ou modifiés et seront présentés dans le chapitre 4 (Améliorations des modèles).

#### 3.1 Modèle de conduite

Le modèle de conduite permet de trouver la vitesse de l'eau à la sortie de celle-ci en fonction des paramètres d'entrée suivant : La hauteur brute de chute, la longueur de la conduite et son diamètre, le débit, et les facteurs de pertes de charge lambda et dzêta.

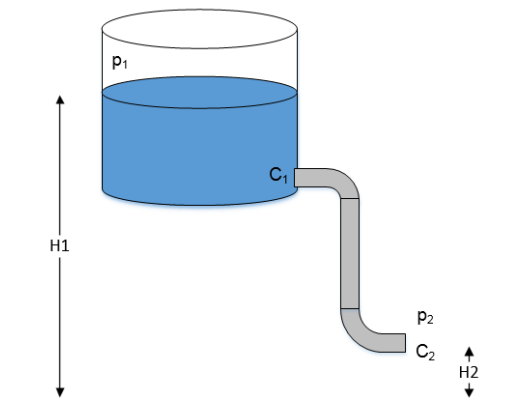


Figure 2 : Différence de pression, Bernoulli

La vitesse à la sortie de notre conduite est déterminée depuis l'équation de Bernoulli :

$$\frac{1}{2} * \rho_1 * C_1^2 + \rho_1 * g * H_1 + p_1 = \frac{1}{2} * \rho_2 * C_2^2 + \rho_2 * g * H_2 + p_2$$

Equation 1 : Bernoulli

Si on considère que :

- $p_1$  et  $p_2$  sont égaux (liquide incompressible)
- $p_1$  et  $p_2$  sont égaux (= pression atmosphérique)
- $H_1$  = altitude niveau bassin supérieur
- $H_2$  = altitude niveau pointeau
- $H$  = hauteur de chute =  $H_1 - H_2$
- $C_1 = 0$  = vitesse eau à l'entrée de la conduite

La simplification de l'équation permet d'en sortir la vitesse à la sortie de la conduite :

$$\frac{1}{2} * \rho * (0 - C_2^2) = -\rho * g * (H_1 - H_2) \Rightarrow C = \sqrt{2 * g * H}$$

Equation 2 : Vitesse de l'eau à la sortie de la conduite

Il faut encore prendre en compte les pertes de charge dans la conduite. Ceci peut être représenté comme une diminution de la hauteur de chute.

$$H_n = H_b - \Delta H_r = H_b - \frac{\Delta p}{\rho * g} = h_{max} - \left( \frac{\lambda * L * Q^2 * 8}{g * \pi^2 * D_h^5} + \frac{\zeta * Q^2 * 8}{g * \pi^2 * D_h^4} \right)$$

Equation 3 : Hauteur de chute nette (chute avec pertes de charge)

Avec :  $H_b$  = hauteur brute,  $\Delta p$  = différence de pression,  $\rho$  = densité de l'eau,  $\lambda$  = facteur pour pertes de charge linéaires,  $\zeta$  = facteur pour pertes de charge singulières,  $Q$  = débit,  $D_h$  = diamètre hydraulique

### 3.2 Modèle de pointeau

En partant du schéma général d'un injecteur :

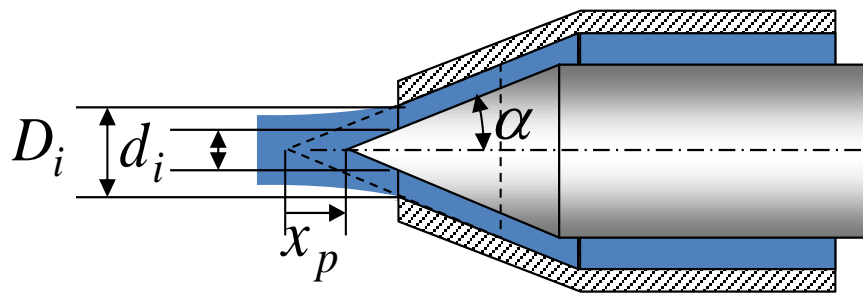


Figure 3 : représentation générale d'un injecteur pour turbine Pelton  
Source : Cours MCR, examen 20.11.2014

l'équation de la section du jet en fonction de la position du pointeau est la suivante, pour  $X_p \in [0, X_{max}]$  :

$$S = \pi * (D_i * X_p * \tan(\alpha) - X_p^2 * \tan(\alpha)^2)$$

Equation 4 : section du jet d'un injecteur de turbine Pelton

### 3.3 Représentation graphique des modèles

Une représentation graphique permet de vérifier la cohérence entre les entrées-sorties du modèle. La position du pointeau est utilisée comme référence : celle-ci étant l'entrée principale du système. En effet, il s'agit de la seule valeur sur laquelle ont agi pour réguler le niveau de nos bassins.

### 3.3.1 Section du jet

Ayant à disposition les dimensions d'un injecteur sous 460m de chute pour une turbine Pelton de 200kW, le diamètre de la buse est adapté pour avoir un débit maximum, dans les conduites, similaire aux données de la figure 1.

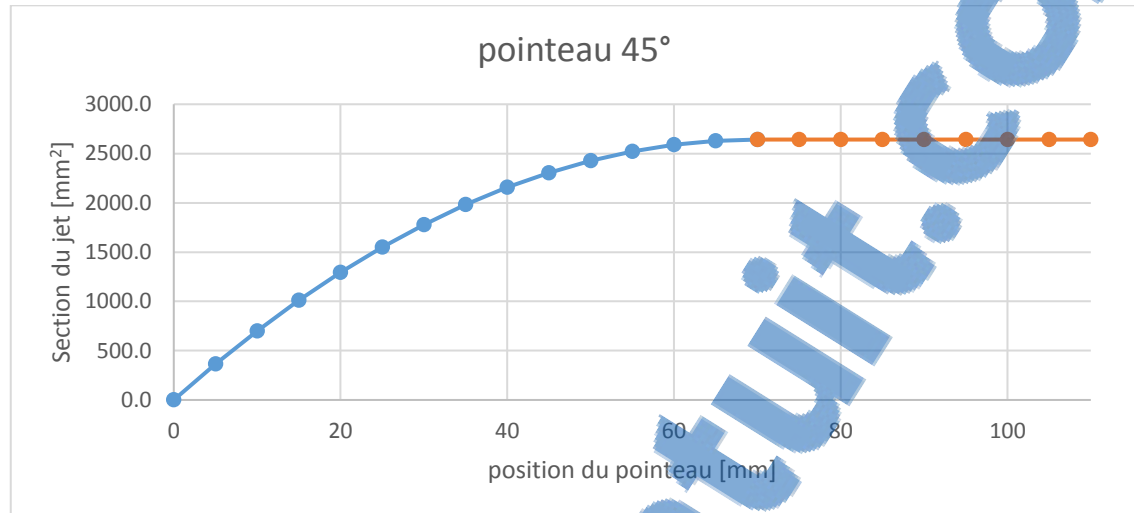


Figure 4 : Section du jet selon la position du pointeau

A partir d'une certaine position la section du jet reste identique à la section maximale. Il ne sert donc à rien d'avoir une course trop grande pour le pointeau. Le diamètre de la buse est de 58 mm et la position maximale du pointeau est de 70 mm.

Le graphique montre qu'il n'y a pas un comportement linéaire entre la position du pointeau et la section du jet. Ceci est pris en compte dans la régulation.

### 3.3.2 Pertes de charge

Pour vérifier l'équation 3 qui met en évidence les pertes de charge, une simulation du système à l'aide de Matlab/Simulink est effectuée. Deux graphiques en ressortent. Le 1<sup>er</sup> (figure 5) représente la hauteur de chute en fonction de la position du pointeau. Une « perte » d'environ 2.8 mètres sur une hauteur totale de 438 mètre est visible, soit 0.64% de variation.

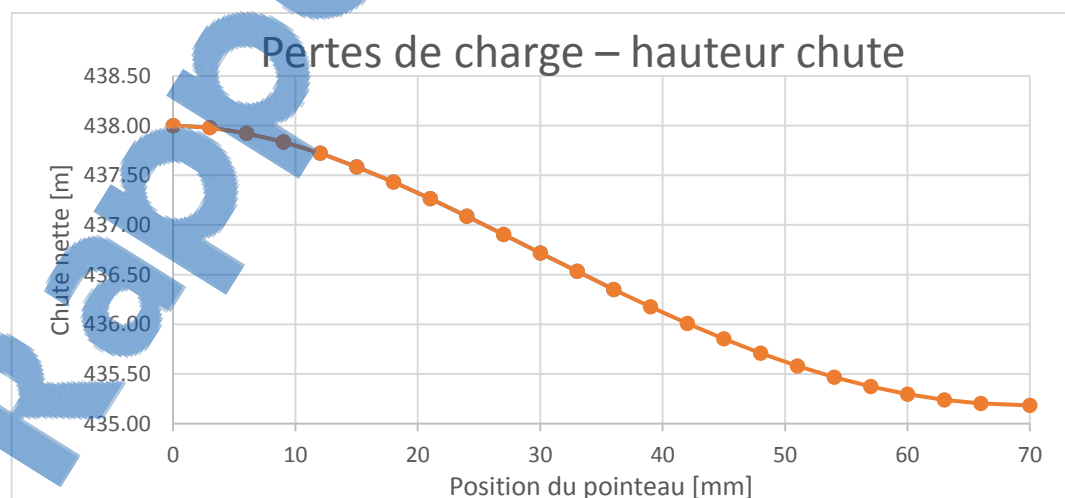


Figure 5 : Hauteur de chute selon la position du pointeau

Le débit étant dépendant de la hauteur de chute, ceci justifie le fait d'exposer la perte de charge en hauteur avant celle en débit. Sur le 2<sup>ème</sup> (figure 6), le débit est représenté en fonction de la position du pointeau :

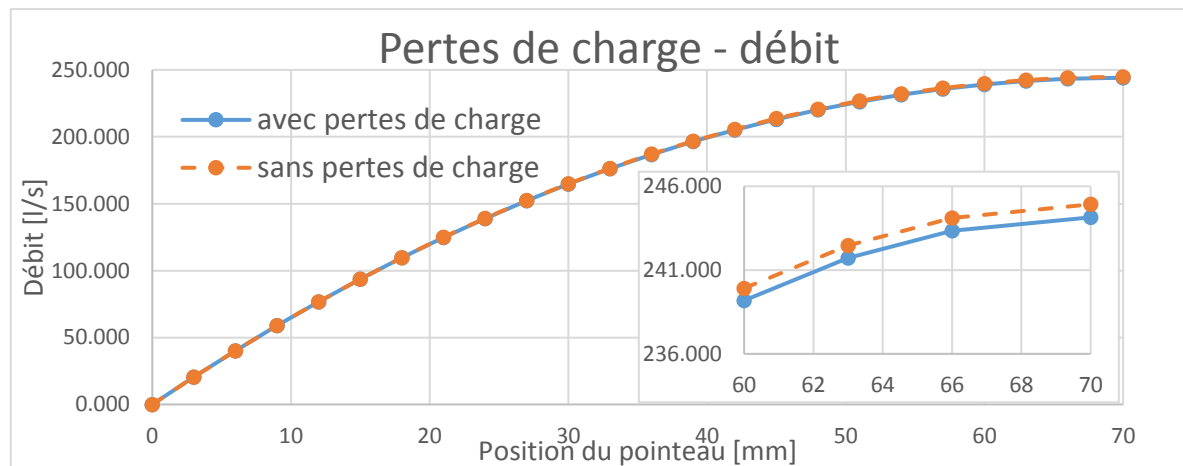


Figure 6 : débit en fonction de la position du pointeau

Le graphique montre que la variation du débit, avec ou sans pertes de charge, est faible. Elle est inférieure à 0.8 litres/seconde. Les différences sont négligeables, dans ce cas, avec des débits faibles. (Pour comparaison dans la centrale hydroélectrique de Bieudron, le débit max est de 75 m<sup>3</sup>/s et les pertes de charge de 100m pour une chute brute avoisinant les 1800 mètres)<sup>1</sup>.

## 4 AMÉLIORATION DES MODÈLES

Afin de se rapprocher le plus possible de la pratique, il est nécessaire de prendre en considération d'autres éléments qui interviennent dans notre système.

### 4.1 Bassin

La géométrie des bassins joue un rôle important. En effet, même avec un volume identique et un débit de sortie identique, la hauteur d'eau varie fortement. Un bassin en forme de parallélépipède rectangle aura une variation de hauteur constante avec un débit de sortie constant. Avec une forme de pyramide tronquée à base rectangulaire ou de cône tronqué, la hauteur variera exponentiellement avec un débit de sortie constant.

Dans la réalité, la géométrie d'un barrage n'est pas aussi simple que les 3 exemples cités ci-dessus, seuls les modèles mathématiques simples, serviront de bases.

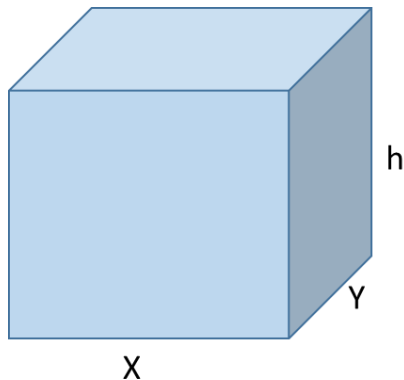
<sup>1</sup> LOTH, Pierre. Aménagement Cleuson-Dixence : turbines et vannes sphérique pour l'usine de Bieudron. 10.03.2016. p. 174.



Ce qui est intéressant dans ces modèles est la hauteur d'eau en fonction d'un certain volume. Ci-dessous, sont montrées, les formules pour calculer le volume en fonction d'une hauteur afin de faciliter la lecture, la hauteur pouvant être trouvée en cherchant les racines de l'équation.

#### 4.1.1 Parallélépipède rectangle

Ce modèle sera utilisé pour la zone médiane des chambres de mise en charge.



$$Volume = X * Y * h$$

Figure 7 : modèle bassin forme cubique

#### 4.1.2 Pyramide tronquée à base rectangulaire

Ce modèle sert de base à la partie inférieur de la chambre de mise en charge.

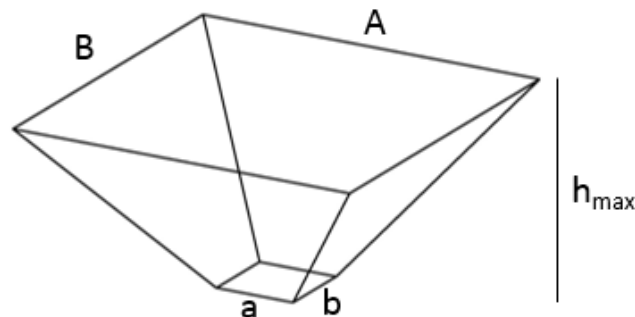


Figure 8 : modèle bassin forme pyramide tronquée

$$Volume = \frac{1}{3} * \left( S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 * S_2} \right) * h$$

Avec :  $S_1 = a * b$  et  $S_2 = A * B$

$$Volume\ disponible = \int_0^h S * dh = (a * b * h) + \left( a * \frac{B-b}{h_{max}} * \frac{h^2}{2} \right) + \left( b * \frac{A-a}{h_{max}} * \frac{h^2}{2} \right) + \left( \frac{A-a}{h_{max}} * \frac{B-b}{h_{max}} * \frac{h^3}{3} \right)$$

Equation 5 : Volume d'une pyramide tronquée

#### 4.1.3 Cône tronqué

Ce modèle peut représenter grossièrement un barrage d'accumulation

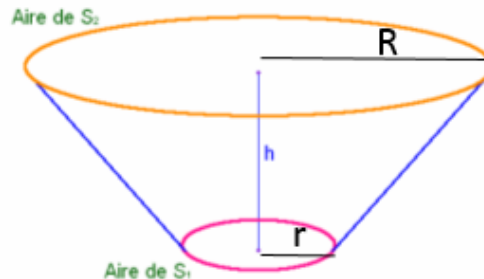


Figure 9 : modèle bassin conique

$$Volume = \frac{1}{3} * \pi * (r^2 + R^2 + r * R) * h$$

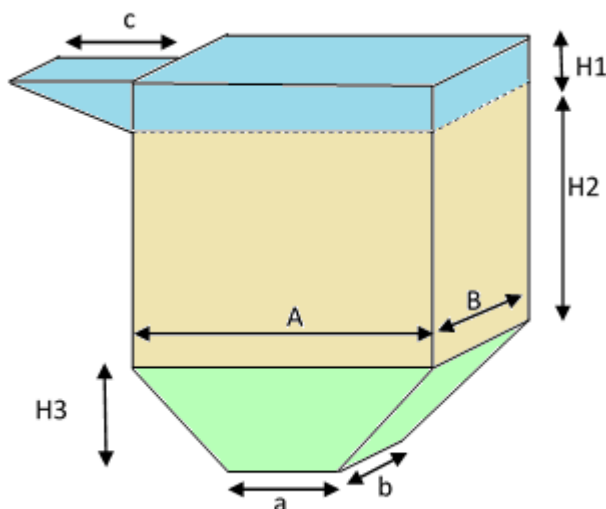
$$Volume\ disponible = \int_0^h S * dh =$$

$$\int_0^h \left( r + h * \tan \left( \tan^{-1} \left( \frac{R-r}{h_{max}} \right) \right) \right)^2 * \pi * dh = (\pi * r^2 * h) + (\pi * \frac{R-r}{h_{max}} * h^2) + (\pi * \frac{R-r}{h_{max}} * \frac{h^3}{3})$$

Equation 6 : Volume d'un cône tronqué

#### 4.2 Chambre de mise en charge

La chambre de mise en charge est un bassin situé en haut de la conduite forcée. Une géométrie possible de cette dernière est représentée ci-dessous (géométrie donnée par Hydro-Exploitation SA).

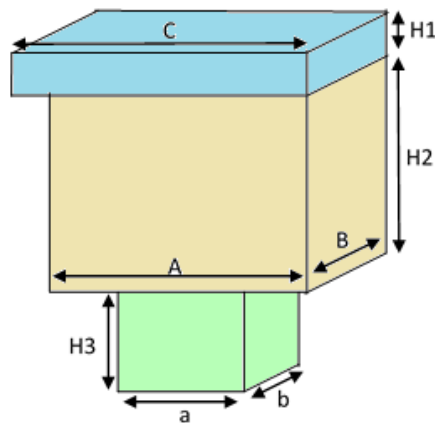


Paramètres	Valeur [m]
A	4
B	2.5
a	2.5
b	1.53
c	8.33
H1	0.5
H2	2
H2	1.5

Zone	Volume [m³]
Supérieur (bleue)	6
Médiane (beige)	20
Inférieure (verte)	10

Figure 10 : Modèle chambre de mise en charge

Pour caractériser le système, la simplification ci-dessous est utilisée. Les zones étant de volumes identiques à ceux exposés plus haut sous la figure 10.



Paramètres	Valeur [m]
A	4
B	2.5
a	3.3
b	2
c	4.8
H1	0.5
H2	2
H2	1.5

Figure 11 : Modèle simplifié chambre de mise en charge

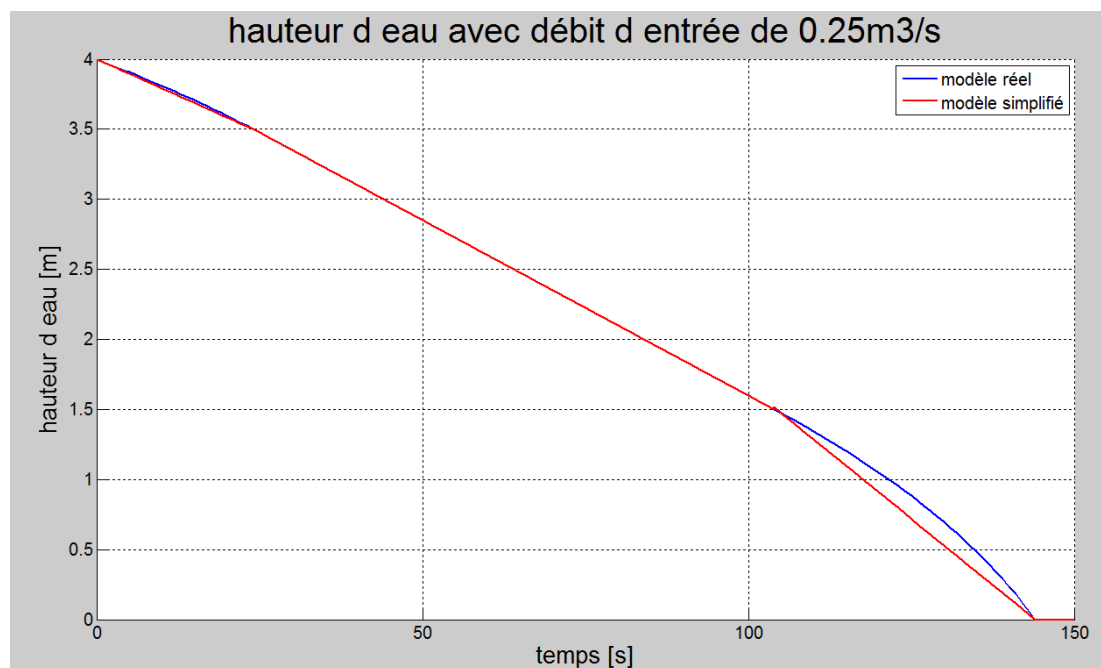


Figure 12 : Différence entre modèle chambre de mise en charge réel et simplifié

Le modèle simplifié se rapproche bien du modèle réel. Il y a de petites différences dans les zones supérieure et inférieure, mais elles ne sont pas importantes pour la suite.

### 4.3 Actionneur/Pointeau

Dans le travail de semestre mentionné plus haut, une consigne de position était directement donnée au pointeau, ce qui est très théorique. Dans la réalité, le pointeau est commandé en position via une vanne proportionnelle qui reçoit une commande en tension.

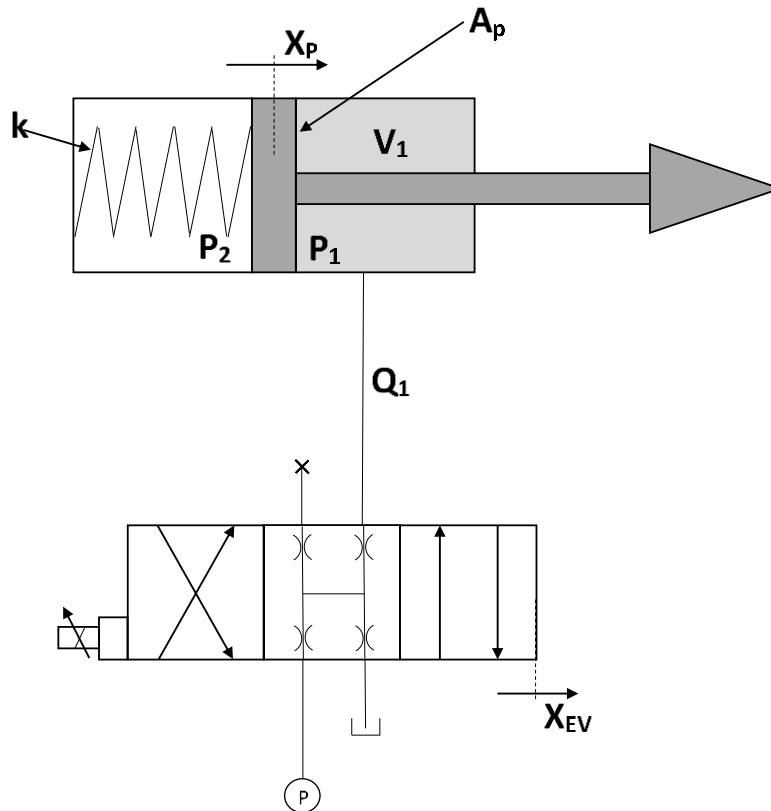


Figure 13 : modèle hydraulique de l'actionneur

#### 4.3.1 Fonctionnement

L'électrovanne proportionnelle est alimentée avec une tension de  $\pm 10V$ . Si on applique  $+10V$ , la vanne va se déplacer à droite, laissant passer un certain débit depuis la pompe jusqu'au piston. Si l'on applique  $-10V$ , la vanne se déplace sur la gauche et l'huile contenue dans le piston peut en sortir, poussée par le ressort du piston et aller à l'échappement de la vanne. Lorsque l'on met  $0V$  aux bornes de la vanne, celle-ci reste dans la position dans laquelle elle se trouve au moment donné.

#### 4.3.2 Modèle de la vanne proportionnelle

Dès lors, le fonctionnement de la vanne proportionnelle est défini par une équation qui exprime la vitesse de cette dernière en fonction de la tension appliquée à ses bornes et de sa position.

$$\dot{X}_{EV}(t) = \frac{1}{T} * (K * U(t) - X_{EV}(t))$$

Equation 7 : Vitesse de déplacement d'une vanne proportionnelle

Avec  $\dot{X}_{EV}(t)$  la vitesse de l'électrovanne,  $X_{EV}(t)$  sa position,  $U(t)$  la tension à ses bornes.

### 4.3.3 Modèle du piston<sup>2</sup>

Les équations décrites ci-dessous sont pour beaucoup tirée du travail cité en bas de page.

#### Equation générale d'écoulement à travers un orifice

L'équation générale d'écoulement à travers un orifice est trouvée de la manière suivante :

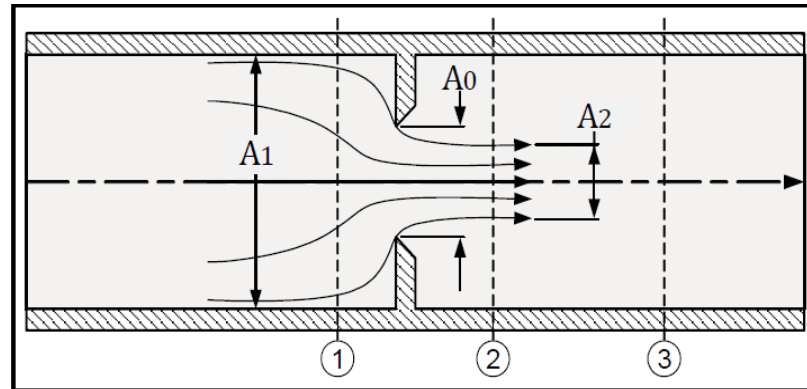


Figure 14 : écoulement à travers un orifice

En partant de l'équation de Bernoulli

$$\rho_1 * g * H_1 + P_1 + \rho_1 * \frac{C_1^2}{2} = \rho_2 * g * H_2 + P_2 + \rho_2 * \frac{C_2^2}{2}$$

Equation 8 : Bernoulli

Avec  $P_1$  la pression avant l'orifice,  $P_2$  celle après l'orifice,  $C_1$  et  $C_2$  respectivement les vitesses d'un côté et de l'autre.

En admettant que les hauteurs  $H_1$  et  $H_2$  sont identiques, la différence entre le carré des vitesses est donnée selon:

$$C_2^2 - C_1^2 = \frac{2}{\rho} * (P_1 - P_2)$$

Equation 9

Le coefficient de contraction  $C_c$  est défini de la manière suivante

$$C_c = \frac{A_2}{A_0}$$

Equation 10

En considérant le fluide comme incompressible, les débits des 2 côtés de l'orifice sont considérés comme égaux.

$$Q = A_1 * C_1 = A_2 * C_2 = C_c * A_0 * C_2$$

Equation 11

<sup>2</sup> MODÉLISATION CAUSALE ET ACAUSALE D'UN SYSTÈME ÉLECTRO-HYDRAULIQUE, MONTRÉAL, LE 2 NOVEMBRE 2011, Tommy GAGNON.



$$Q_B = Q_{PB} - Q_{BT}$$

Equation 16

Donc selon l'équation d'écoulement à travers un orifice :

$$Q_B = C_D * A_{BT} * \sqrt{\frac{2}{\rho} * (P_B - P_T)} - C_D * A_{PB} * \sqrt{\frac{2}{\rho} * (P_P - P_B)}$$

Equation 17

Les sections de passage dans la vanne varient en fonction de la position de celle-ci selon :

$$A_{PB}(X_{EV}) = A_{BT}(-X_{EV})$$

Equation 18

$$A = \frac{A_{max}}{X_{EV max}} * X_{EV} = k_0 * X_{EV}$$

Equation 19

Finalement le débit Q1 correspond à :

$$Q_1 = Q_B = C_D * k_0 * X_{EV} * \left( u(-X_{EV}) * \sqrt{\frac{2}{\rho} * (P_B - P_T)} + u(X_{EV}) * \sqrt{\frac{2}{\rho} * (P_P - P_B)} \right)$$

Equation 20 : débit à travers la vanne proportionnelle

Avec  $u(x) = \begin{cases} 0 & : x < 0 \\ 1 & : x \geq 0 \end{cases}$

### Augmentation de pression dans un volume de contrôle variable (Côté pointeau)

La variation de pression d'un volume variable se comporte selon :

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\beta}{V} * \left( Q - \frac{dV}{dt} \right)$$

Equation 21

Dans le cas du piston qui entraine le pointeau, le volume varie en fonction de la position du pointeau

$$\frac{dV}{dt} = -A_p * \frac{dX_p(t)}{dt}$$

Equation 22

Donc la pression varie selon :

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{\beta}{V_1 - A_p * X_p(t)} * (Q_1 + A_p * \dot{X}_p(t))$$

Equation 23

## Variation de la pression due au ressort

Selon une loi de Newton

$$F = m * a = k * X_p$$

Equation 24

La pression peut alors être trouvée

$$P_2 = \frac{F}{S} = \frac{k * X_p}{A_p} \quad \Rightarrow \quad \dot{P}_2(t) = \frac{k * \dot{X}_p(t)}{A_p}$$

Equation 25

## Modèle du piston final

En égalisant la variation de pression des 2 côtés du piston, les équations 23 et 25. Puis en utilisant 15 et 20, il suffit alors d'isoler la vitesse du piston pour obtenir le modèle du piston.

$$\dot{X}_p(t) = \frac{\beta}{V_1 - A_p * X_p(t)} * C_D * k_0 * X_{EV} * \text{sign}\{X_{EV}\} * u(-X_{EV}) * \sqrt{\frac{2}{\rho} * \left( P_{pompe} - \frac{1}{A_p} * (F_0 + k * X_p(t)) \right)} * \left( \frac{k}{A_p} - \frac{\beta * A_p}{V_1 - A_p * X_p(t)} \right)^{-1}$$

Equation 25 : équation du déplacement du piston

Avec  $\dot{X}_p(t)$  la vitesse de déplacement du piston (pointeau),  $X_p(t)$  sa position et  $X_{EV}$  la position de la vanne proportionnelle.

Le tableau ci-dessous indique les valeurs des différents coefficients utiles pour les équations mentionnées ci-dessus. Ces valeurs sont données par Hydro-Exploitation SA. Elles sont implémentées dans le modèle de l'actionneur pour la régulation de position.

Désignation	Symbole	Valeurs	Unité
Gain de conversion de l'électrovanne	K	0.0006	m/V
Constante de temps de l'électrovanne	T	0.02	s
Déplacement maximum de l'électrovanne	$X_{EV \max}$	0.006	m
Précontrainte du ressort du piston	$F_0$	1256	N
Surface du piston	$A_p$	0.013	m <sup>2</sup>
Volume initial	$V_1$	10-8	m <sup>3</sup>
Constante du ressort	k	62817	N/m
Module d'élasticité de l'huile	$\beta$	$1.7 * 10^9$	Pa
Masse volumique de l'huile	$\rho$	800	kg/m <sup>3</sup>
Gain position EV/surface orifice libérée	$K_0$	$1.37 * 10^{-4}$	m <sup>2</sup> /m
Coefficient de décharge de l'orifice	$C_D$	0.65	-
Pression fournie par la pompe	$P_{pompe}$	70	bar
Course de l'injecteur	$L_{\max}$	0.07	m

Figure 16 : caractéristique du système actionneur



## 5 1 ÉTAGE

Afin de réguler un système étagé, l'intérêt se portera, pour commencer sur la régulation d'un seul étage, qui comprend les éléments suivants :

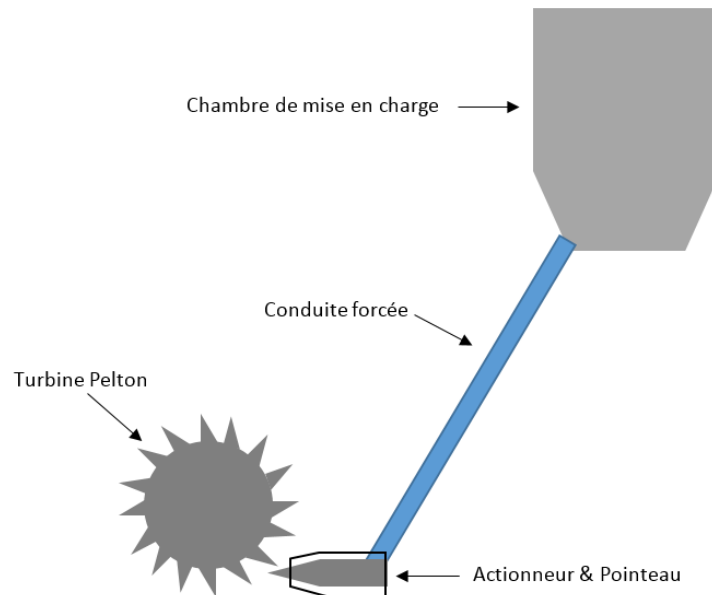


Figure 17 : représentation du 1<sup>er</sup> étage

Le but est de réguler le niveau d'eau dans la chambre de mise en charge. Pour ce faire, la consigne de niveau est comparée avec la valeur actuelle. Une consigne de position est donnée au pointeau, ce qui permet de vider, ou non, le bassin.

Comme le montre la figure 18 ci-dessous, le système global est régulé en cascade. Celui-ci comprend, un système de position, qui a comme but de réguler la position du pointeau en appliquant une tension à la vanne proportionnelle. En dessus, un régulateur de niveau s'occupe de réguler la hauteur d'eau en donnant une consigne de débit.

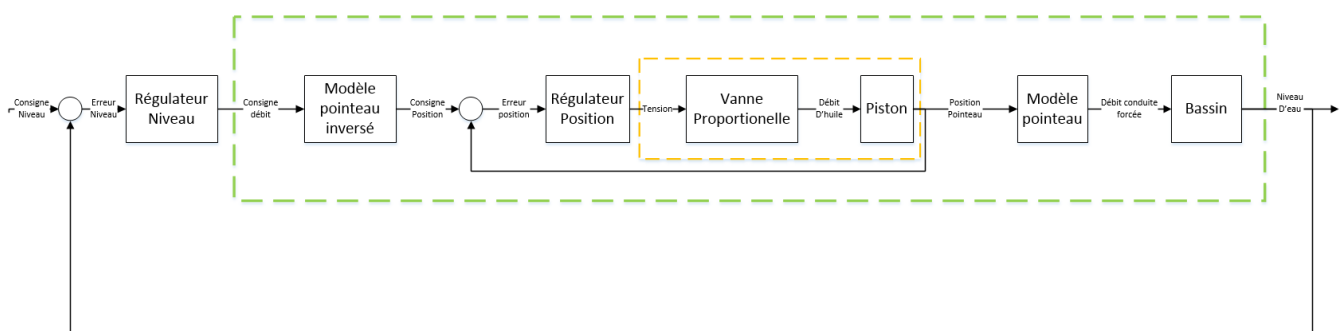


Figure 18 : schéma bloc régulation 1<sup>er</sup> étage

En régulation, la boucle intérieure (système « position ») doit être dimensionnée et régulée en premier. La boucle extérieure (système « niveau ») est réalisée par la suite. En réalité, la régulation étant implémentée dans un automate dont le temps de cycle est fixé à 20 ms (la période d'échantillonnage =  $h = 0.02$  [s]).

## 5.1 Système « position »

Comme mentionné auparavant, ce système sert à placer le pointeau à l'endroit voulu.

Les modèles de la vanne proportionnelle et du piston, sachant que le pointeau n'est rien d'autre que la prolongation du piston, sont implémentés sur Matlab/Simulink pour observer le comportement du système et ensuite le réguler. La figure 19 montre l'entrée du système (Tension sur la vanne) et la sortie (position du pointeau/piston).

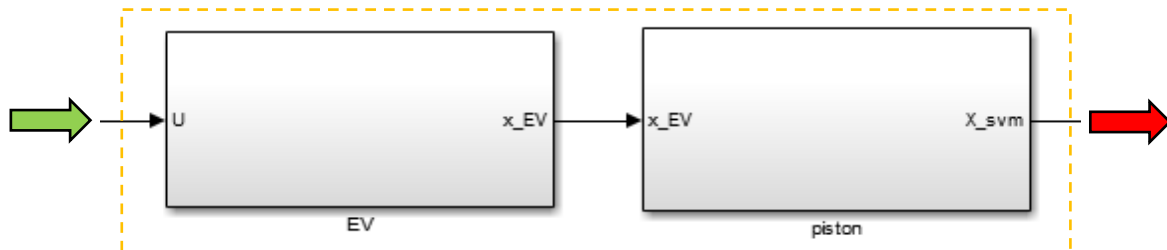


Figure 19 : Système actionneur

Le système est comme une boîte noire dans laquelle l'objectif est de définir la relation entre l'entrée et la sortie. Pour cela un saut indiciel est effectué sur l'entrée et le comportement en sortie est relevé.

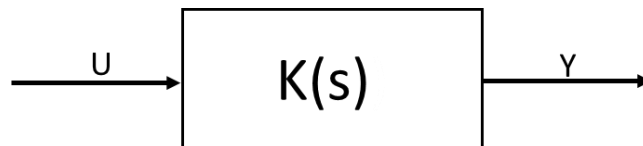


Figure 20 : Système actionneur à définir

La sortie est représentée dans la figure 21.

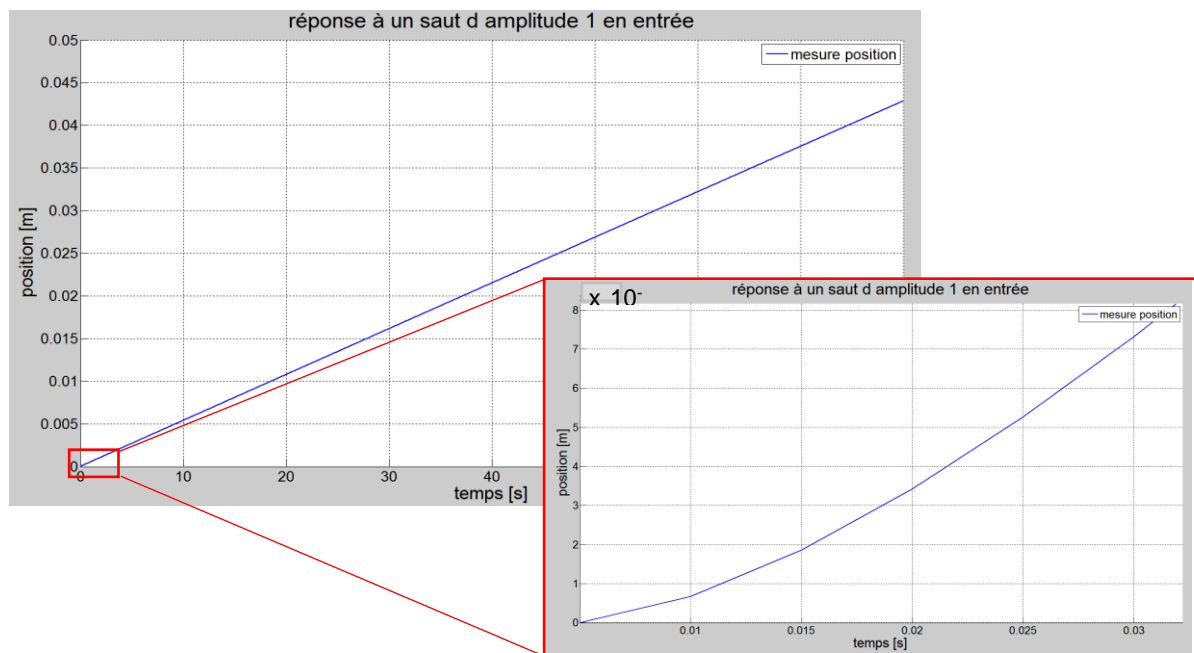


Figure 21 : sortie du système position après un saut indiciel

Au vu du tout petit arrondi en début de courbe, celle-ci est considérée comme une rampe.

Le système « position » est donc comparable à un intégrateur.

$$K(s) = m * \frac{1}{s}$$

Equation 27 : FT simplifiée du système.

La constante m est égale au quotient de la pente de la sortie par l'amplitude du saut indiciel. Elle est considérée comme constante (plus le saut indiciel est grand, plus la pente est raide).

### 5.1.1 Régulation

L'insertion d'un régulateur permet de varier la tension sur la vanne en fonction de la différence entre la position du pointeau et une valeur de consigne. Le système possédant déjà un intégrateur, un régulateur PD est choisi. (Cours FET-AuR-Script S5 v2015.1 Fr, mad, Chapitre 3.7.6, p.3-140, par Jean-Daniel Marcuard)

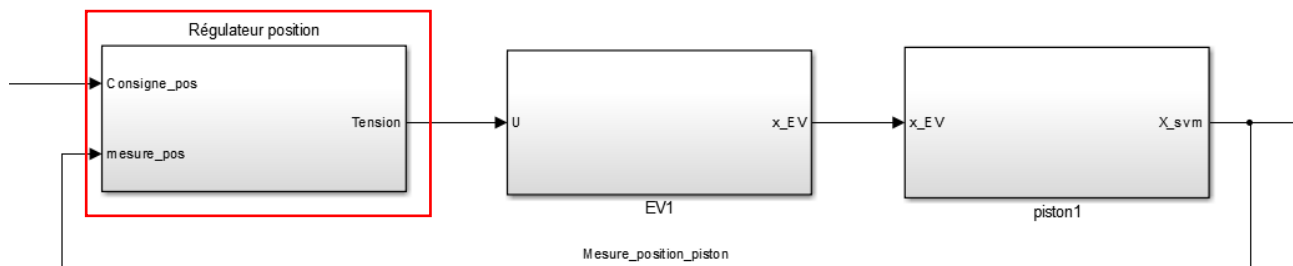


Figure 22 : système position avec régulateur

Un régulateur PD est créé comme le montre la figure 23. Afin de limiter l'amplification des parasites, on filtre la partie D.

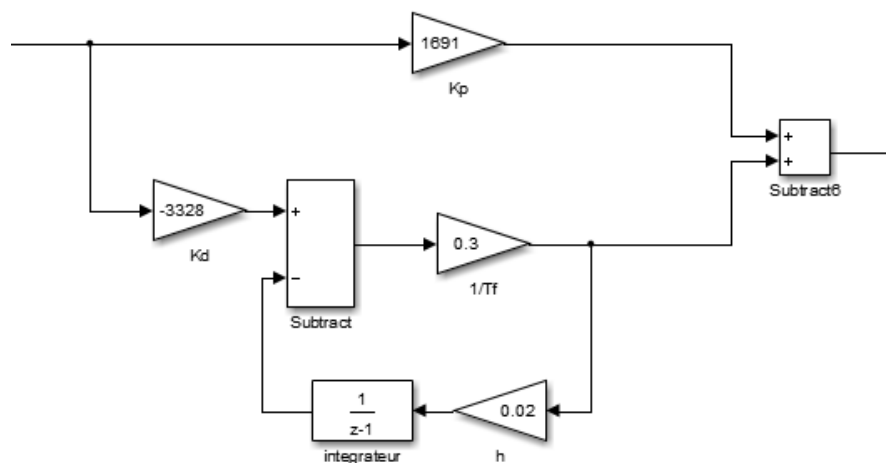


Figure 23 : Régulateur PD filtré

La fonction de transfert du régulateur est donc :

$$G(s) = \frac{K_p * (1 + T_d * s)}{1 + T_f * s} = K_p + K_d * s * \left( \frac{1}{1 + T_f * s} \right) = \frac{K_p + K_p * T_f * s + K_d * s}{1 + T_f * s}$$

Equation 28 : FT régulateur PD

Le système monté avec le régulateur peut être représenté de la façon suivante :

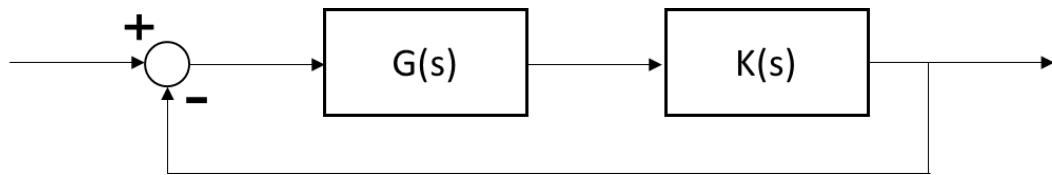


Figure 24 : Système régulé

Les équations du système en boucle ouverte et en boucle fermée peuvent être écrites.

$$F_{OL} = K(s) * G(s) = \frac{m}{s} * \frac{K_p + K_p * T_f * s + K_d * s}{1 + T_f * s} = \frac{m * K_p + (m * K_p * T_f + m * K_d) * s}{T_f * s^2 + s}$$

Equation 29 : FT du système position en boucle ouverte.

$$F_{CL} = \frac{K(s) * G(s)}{1 + K(s) * G(s)} = \frac{\left( T_f + \frac{K_d}{K_p} \right) * s + 1}{\frac{T_f}{m * K_p} * s^2 + \left( \frac{1}{m * K_p} + T_f + \frac{K_d}{K_p} \right) * s + 1}$$

Equation 30 : FT du système position en boucle fermée.

L'option choisie pour dimensionner les gains du régulateur est de le comparer à un filtre objectif.

Il suffit alors d'égaliser les dénominateurs de la fonction de transfert du filtre objectif et de la FT de notre système en boucle fermée.

$$F_{filtre} = \frac{1}{1 + a_1 * \frac{s}{\omega_g} + b_1 * \frac{s^2}{\omega_g^2}}$$

Equation 31 : FT d'un filtre objectif d'ordre 2.

$$K_p = \frac{T_f * \omega_g^2}{m * b_1} \quad K_d = \left( \frac{a_1}{\omega_g} - \frac{1}{m * K_p} - T_f \right) * K_p$$

Equation 32 : Gain proportionnel et dérivateur selon filtre objectif

Le choix d'un filtre objectif du 2ème ordre à atténuation critique est effectué afin d'éviter des oscillations (« over-shoot »). Celui-ci fixe les composantes  $a_1$  et  $b_1$ . A l'aide d'un script Matlab, l'allure du système est analysée en faisant varier la pulsation de coupure  $\omega_g$  et la constante de temps du filtre du régulateur.

Selon le théorème de Shanon,  $T_f$  doit être au moins 2 fois plus grand que  $h$ . Dans la pratique il est souvent pris entre 5 et 20 fois la période d'échantillonnage. Le test avec différentes constantes de temps du filtre est effectué. Le choix de trop petites ou de trop grandes constantes, implique un « over-shoot » plus important.  $T_f$  est choisi égal à 0.1 soit 5 fois plus grand que  $h$

Pour ce qui est de la pulsation de coupure  $\omega_g$ , elle est choisie volontairement assez élevée (3 rad/s). Ceci afin d'atteindre la valeur de consigne rapidement, aux alentours de 2 secondes.

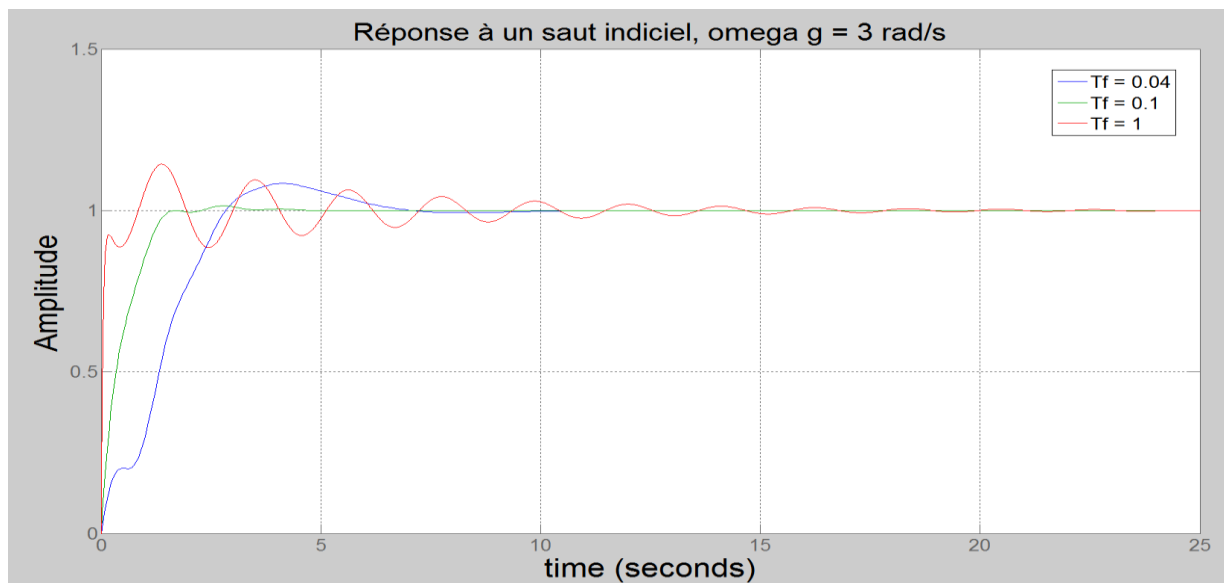


Figure 25 : réponse à un saut indiciel, choix de la constante de temps du filtre du régulateur PD

### Consigne en forme de rampe.

D'un point de vue pratique, le pointeau ne peut pas s'ouvrir de 0 à 100% plus rapidement qu'en 40 secondes, ceci afin d'éviter un coup de bélier dans la conduite. Un coup de bélier est une surpression entraînée par l'ouverture ou la fermeture d'une vanne (d'un robinet), faisant varier rapidement la vitesse du fluide et pouvant entraîner la destruction de la conduite.

Des mesures doivent être prises afin de respecter ce temps. Du point de vue software, une fonction s'occupe de limiter une variation trop rapide de la consigne de position en une rampe.

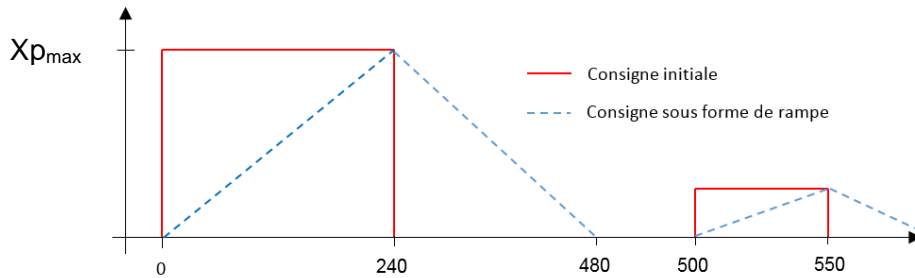


Figure 26 : représentation de la fonction rampe

### 5.1.2 Résultats

En réalité, la consigne maximum reçue par le régulateur a donc une forme de rampe.

Les valeurs suivantes ont été utilisées pour la simulation de régulation de la position du pointeau.

Constante de temps filtre régulateur, $T_f$	0.1	s
pulsation de coupure, $\omega_g$	3	rad/s
	0.33	s
Gain proportionnel, $K_p$	4356	V/m
Gain partie D, $K_d$	-571	V/m

Figure 27: Caractéristiques régulation position

Au vu du faible gain pour la partie D, comparé au gain  $K_p$ ,  $K_d$  peut être négligé.

Afin de voir la rapidité du régulateur de position, un test de celui-ci est réalisé en appliquant un saut de consigne de position.

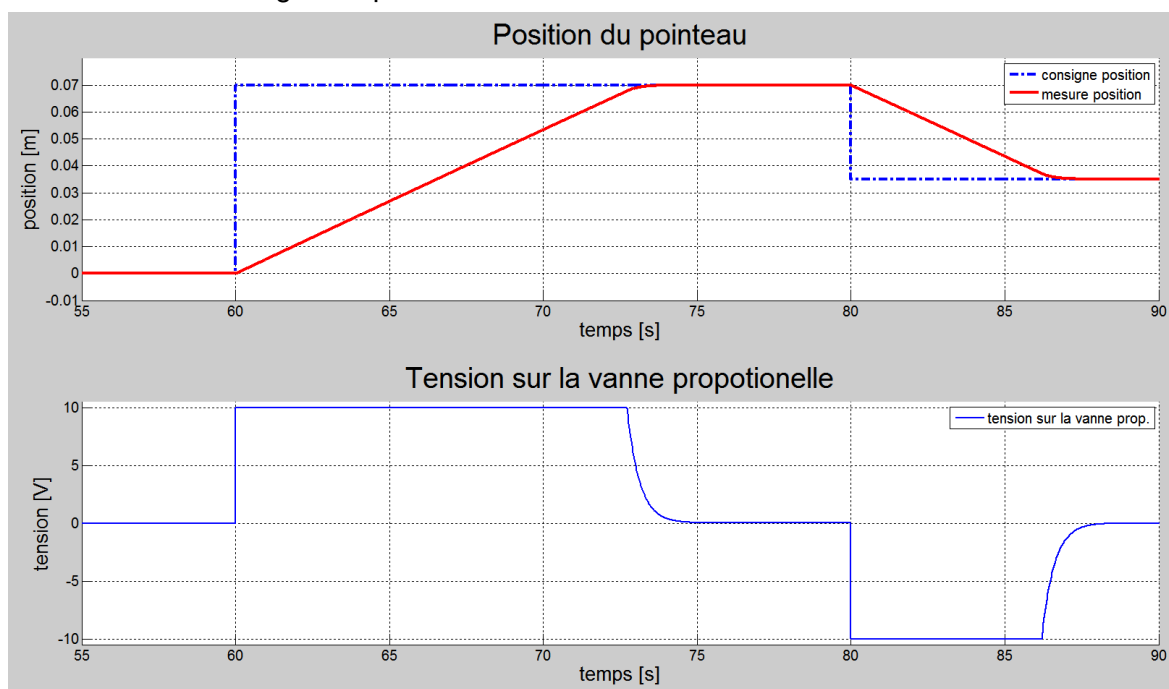


Figure 28 : Réponse à un saut indiciel de la position du pointeau

Une fois la consigne reçue, la tension aux bornes de la vanne proportionnelle monte, ce qui a pour effet de faire bouger le pointeau. Lorsque la valeur de consigne est atteinte, la tension est nulle et le pointeau reste dans sa position. Pour un saut sur la consigne, d'amplitude maximum, il faut entre 13 et 14 secondes pour que le pointeau arrive à la consigne.

La consigne sous forme de rampe est facilement suivie.

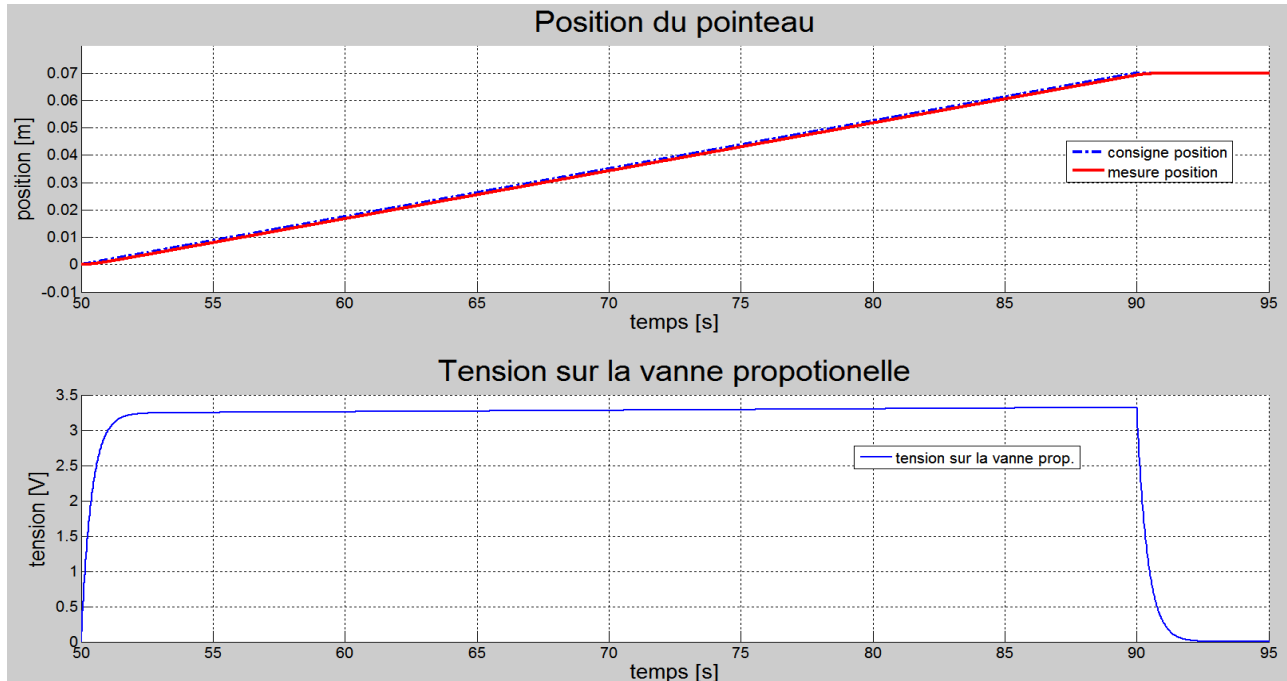


Figure 29 : réponse à une consigne sous forme de rampe de la position du pointeau

### 5.1.3 Variations des caractéristique de l'actionneur

Ci-dessus, le système position se base sur le modèle de l'actionneur avec les caractéristiques exposées dans la figure 16.

La constante du ressort du piston rend un déplacement de 90% à 100% (cas 1) d'ouverture plus difficile qu'un déplacement de 10 à 20 % (cas 2). La pression de la pompe (70 bar) est dimensionnée en fonction de la pression nécessaire à comprimer le ressort de manière presque similaire au début ou à la fin du déplacement. Afin de démontrer cela, une simulation avec une pompe de 10 bar est aussi effectuée. La comparaison du temps, mis pour effectuer les déplacements des cas 1 et 2 avec les 2 pompes, démontre qu'un mauvais dimensionnement fait varier le comportement du piston différemment.

Pompe 70 bars

actions	temps [s]
ouverture 90->100 %	1.50
ouverture 10->20%	1.48
différence temps	0.02

Pompe 10 bar

actions	temps [s]
ouverture 90->100 %	5
ouverture 10->20%	4.3
différence temps	0.7

Une autre constatation peut être faite. Au vu du volume de la mise en charge ( $36 \text{ m}^3$ ) et du débit maximum de sortie ( $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ ), celle-ci est vidée le plus rapidement possible en 144 secondes. Le temps d'ouverture et de fermeture du pointeau de 0 à 100% joue alors un rôle essentiel. Un temps trop faible entrainera un coup de bélier, alors qu'avec une durée

trop élevé, la chambre de mise en charge sera vide avant même que le pointeau soit entièrement ouvert. Afin de pouvoir réguler le système de manière dynamique, évitant un dénoyage ainsi qu'un déversement, le choix de ce délai doit être choisi en fonction du volume de la chambre de mise en charge. Un volume plus grand permet un temps d'ouverture supérieur.

## 5.2 Système « niveau »

Après avoir régulé le système de position, il faut maintenant s'occuper de la régulation de niveau. Ci-dessous, le système est représenté avec la limitation de consigne sous forme de rampe.

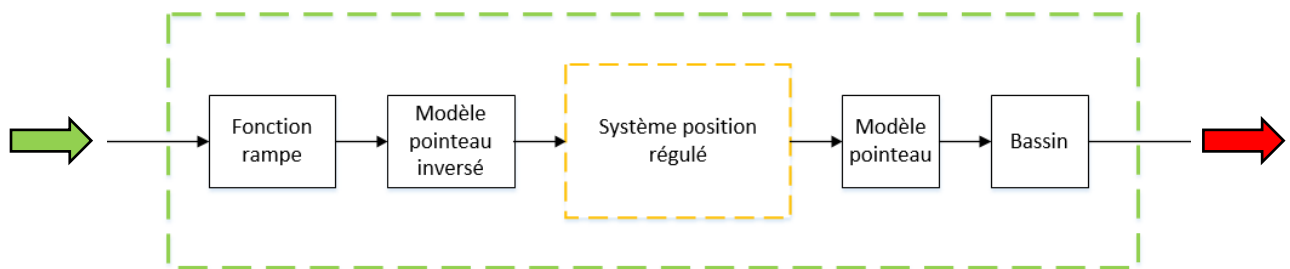


Figure 30 : Système niveau

De plus, la figure 30, montre l'entrée du système (consigne de débit) et la sortie (niveau d'eau du bassin). Dans le cas présent, le bassin à réguler est une chambre de mise en charge.

Le niveau d'eau varie selon le débit entrant ou/et sortant. Le débit dépend de la position du pointeau, mais varie plus fortement lorsque celui-ci est moins ouvert pour le même écart, à cause de sa géométrie. Afin de pouvoir normaliser la variation du niveau de la chambre de mise en charge, le choix est fait de prendre comme entrée du système une consigne de débit et non une consigne de position.



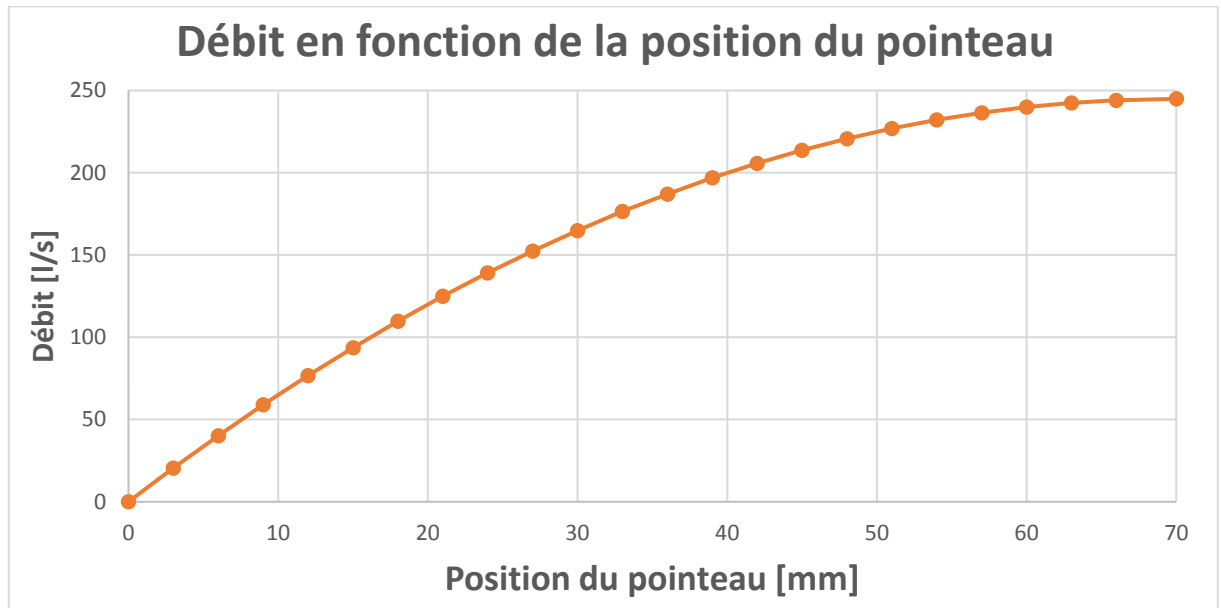


Figure 31 : débit en fonction de la position du pointeau

### 5.2.1 Détermination du système

La variation du niveau d'eau dans la chambre de mise en charge dépend de la zone dans laquelle on se trouve. De plus, pour atteindre une consigne de débit, la fonction de rampe limitant d'ouverture et la fermeture du pointeau, l'amplitude du saut en entrée feront varier le comportement de la sortie.

Le niveau supérieur de la chambre de mise en charge est représenté par une grande chambre (voir figure 11, pour les dimensions de surface, la hauteur n'étant pas importante), la zone médiane est représentée par une chambre de mise en charge moyenne et la partie inférieure par une petite chambre de mise en charge.

Pour ne pas surcharger le rapport, il n'est exposé que le développement du système pour la zone médiane. Les différentes valeurs sont elles données pour les 3 zones.

Selon le saut indicel effectué en entrée, la sortie (niveau d'eau) est représentée sur la figure 32. L'allure de notre système  $K(s)$  est alors définie.

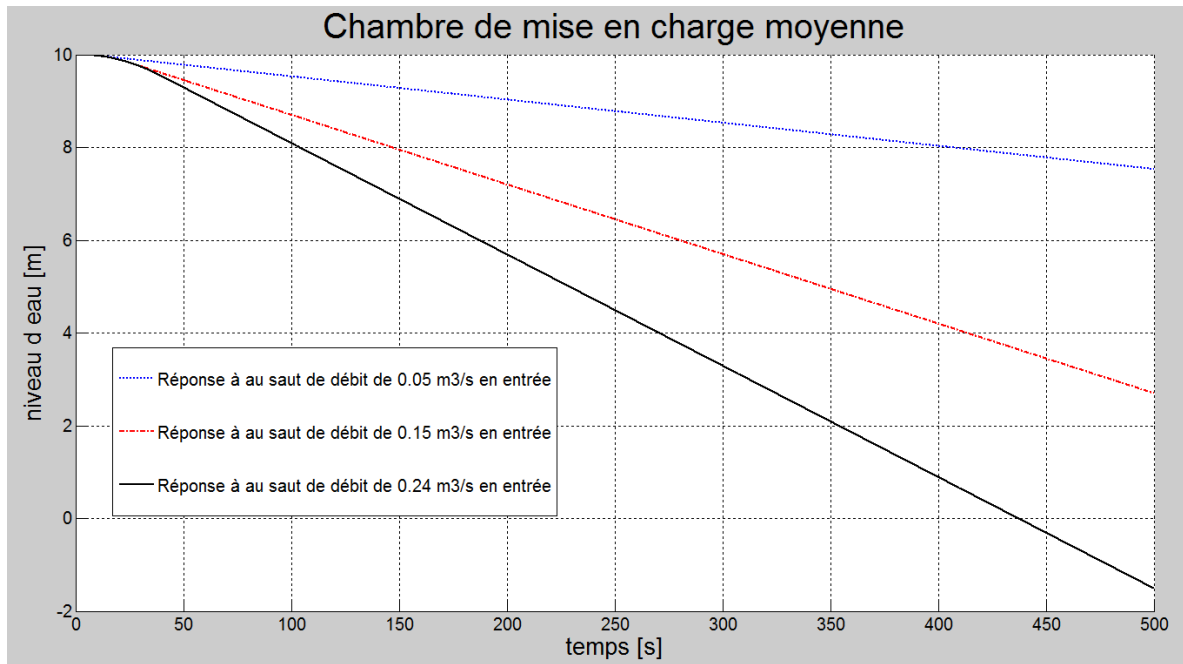


Figure 32 : Réponse à un saut indiciel, système niveau

Le système « niveau » est comparable à un filtre du 1<sup>er</sup> ordre avec un intégrateur.

$$K(s) = \left( \frac{1}{T * s + 1} \right) * m * \frac{1}{s} = \frac{m}{T * s^2 + s}$$

Equation 33 : FT système niveau

Il reste à déterminer les constantes « m » (quotient de la pente de la sortie par l'amplitude du saut indiciel) et « T » (constante de temps de l'élément du 1<sup>er</sup> ordre).

La valeur de « m » est identique quelle que soit l'amplitude du saut en entrée, contrairement à la constante de temps. Cette dernière est déterminée par essais successifs. Une optimisation, par exemple avec la méthode des moindres carrés, pourrait être effectuée afin de déterminer l'optimum. Ci-dessous, la différence entre le modèle et la fonction de transfert approchée (figure 33) est représentée. Au vu des faibles écarts et une stabilisation de l'erreur, la FT approchée est considérée comme suffisante.

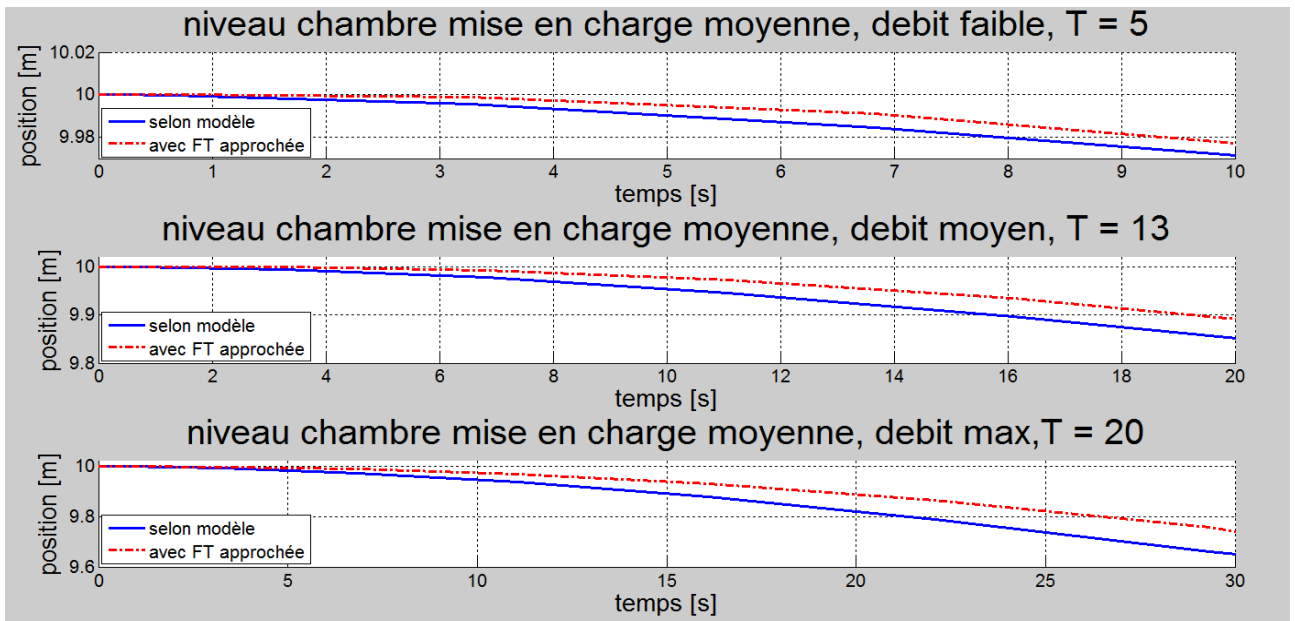


Figure 33 : différences entre modèle système niveau et FT approchée

Les valeurs suivantes ont été utilisées pour la suite:

			Paramètre "m"	Paramètre "T"		
				saut = 0.015	saut 0.15	saut 0.24
chambre de mise en charge	grande		-0.084	5	13	20
	moyenne		-0.1			
	petite		-0.152			

Figure 34 : Valeurs pour les FT approchées du système niveau

## 5.2.2 Régulation gain constant, critère symétrique

Pour commencer, comme le système contient un intégrateur, le choix est fait de dimensionner le régulateur selon le critère symétrique. Le degré du régulateur est choisi selon le degré du système. Le système étant un intégrateur avec des retards, il est du 1<sup>er</sup> degré. Le choix se porte sur un régulateur PI.

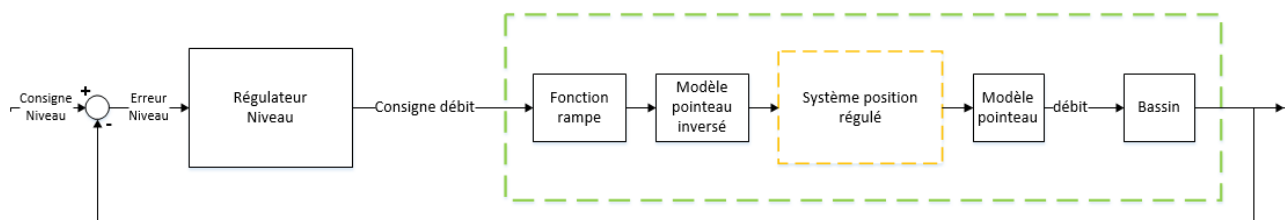


Figure 35 : Système niveau régulé

Le régulateur créé sur Matlab/Simulink à la forme suivante :

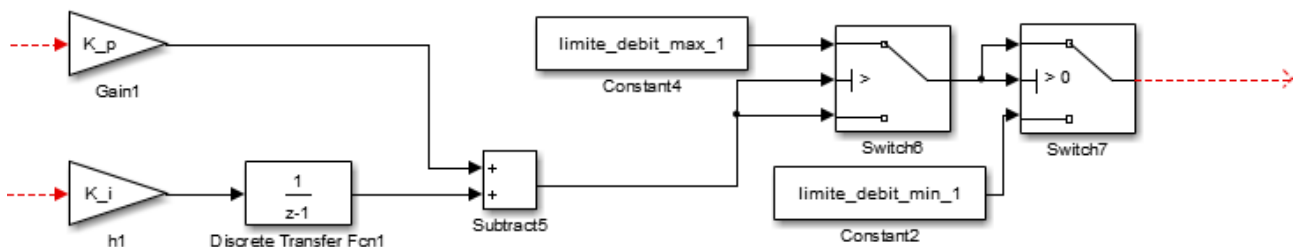


Figure 36 : Régulateur PI saturé

La fonction de transfert du régulateur est :

$$G(s) = K_p + K_i * \frac{1}{s} = \frac{K_p * s + K_i}{s} = \frac{T_n * s + 1}{s * T_i}$$

Equation 34 : FT Régulateur PI

Les équations du système en boucle ouverte et en boucle fermée peuvent être écrites.

$$F_{OL} = K(s) * G(s) = \frac{m}{T * s^2 + s} * \left( \frac{T_n * s + 1}{s * T_i} \right) = m * \frac{T_n * s + 1}{s * T_i * (T * s + 1) * s}$$

Equation 35 : FT du système niveau PI en boucle ouverte

$$F_{CL} = \frac{K(s) * G(s)}{1 + K(s) * G(s)} = m * \frac{T_n * s + 1}{s^2 * T_i * (T * s + 1) + m * (T * s + 1)}$$

Equation 36: FT du système niveau PI en boucle fermée

Selon des informations trouvées dans un cours de régulation<sup>3</sup>, le système n'ayant pas de constante de temps à compenser

$$T_n = 4 * T$$

Et avec une imposition adéquate des pôles (1pôle complexe et 2 pôles c.c.) :

$$T_i = 8 * m * T^2$$

Les gains de la partie proportionnelle et de la partie I du régulateur sont les suivants :

$$K_p = \frac{1}{2 * m * T} \quad K_i = \frac{1}{8 * m * T^2}$$

Equation 37: gain régulateur PI système niveau

<sup>3</sup> Cours FET-AuR-Script S5 v2015.1 Fr, mad, Chapitre 3.7.6, p.3-140, par Jean-Daniel Marcuard

### 5.2.3 Résultat pour gain constant selon critère symétrique, régulateur PI.

Les valeurs suivantes ont été utilisées pour la simulation de régulation de niveau de la chambre de mise en charge.

Constante de temps système, T	13	s
pente/saut indiciel, m	-0.084	m/(m <sup>3</sup> /s)
Gain proportionnel, Kp	-0.4578	(m <sup>3</sup> /s)/m
Gain partie I, Ki	-0.0088	(m <sup>3</sup> /s)/m

Figure 37 : Caractéristiques régulateur PI système niveau

Le système est régulé selon les caractéristiques de la zone supérieure de la chambre de mise en charge et un débit moyen. Lors d'un apport d'eau, celle-ci arrive dans le bassin sous la forme d'un système du 1<sup>er</sup> ordre de constante de temps d'une minute.

Les temps exprimé ci-dessous sont déterminé à partir du démarrage du système.

Pour tester le système, le niveau initial correspond au niveau maximum de la chambre de mise en charge. Le but est d'amener l'eau à une hauteur de consigne, aucun apport d'eau n'a lieu. Ensuite pour tester les cas extrêmes, un apport maximum (0.25 m<sup>3</sup>/s) arrive dans la chambre de mise en charge, suivit d'un apport moyen (0.1 m<sup>3</sup>/s) selon la figure 38.

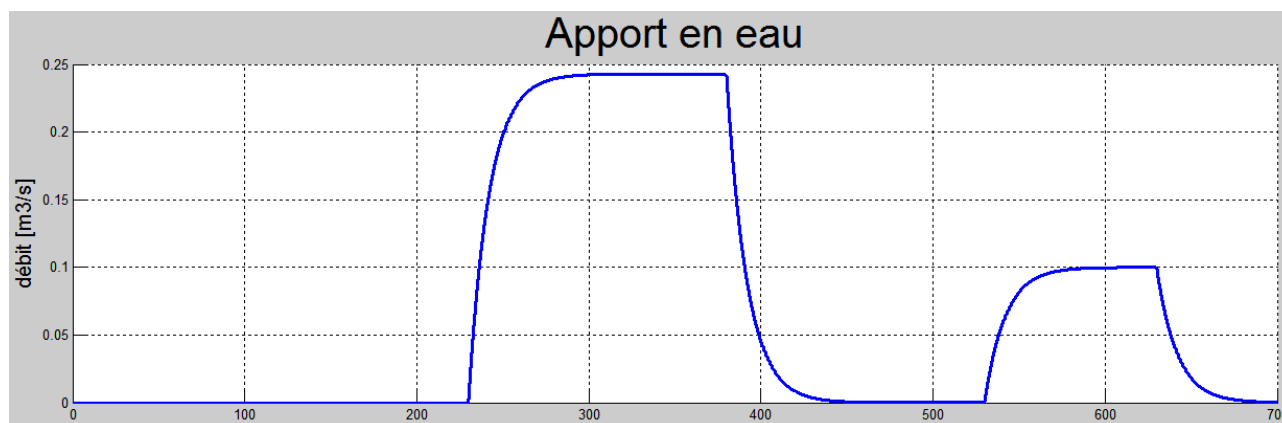


Figure 38 : Apport en eau chambre de mise en charge

## Systeme sans « anti-windup »

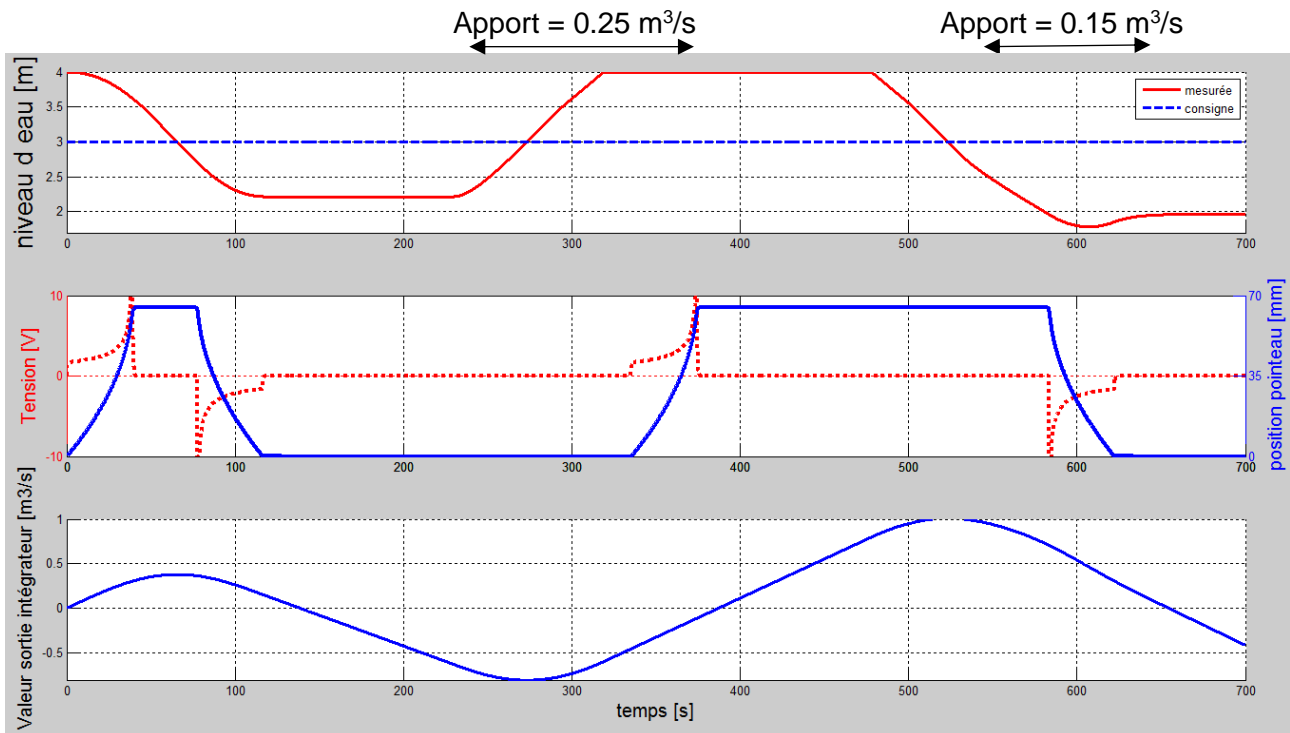


Figure 39 : Résultat régulation PI sans anti-windup

Le niveau d'eau est supérieur à la valeur de consigne. Une tension est appliquée sur la vanne proportionnelle, ce qui a pour conséquence d'ouvrir le pointeau et de vider la chambre de mise en charge. Le niveau se stabilise en dessous de la consigne de niveau (léger overshoot). Lorsqu'un apport survient, le niveau dépasse la consigne et le système ne réagit que longtemps, 100 secondes, après. Au temps 320, le niveau du bassin est au maximum (4 mètres) : un déversement a lieu à ce moment-ci. Ce dernier, qui s'élève à 9 m³, est représenté dans la figure 40.

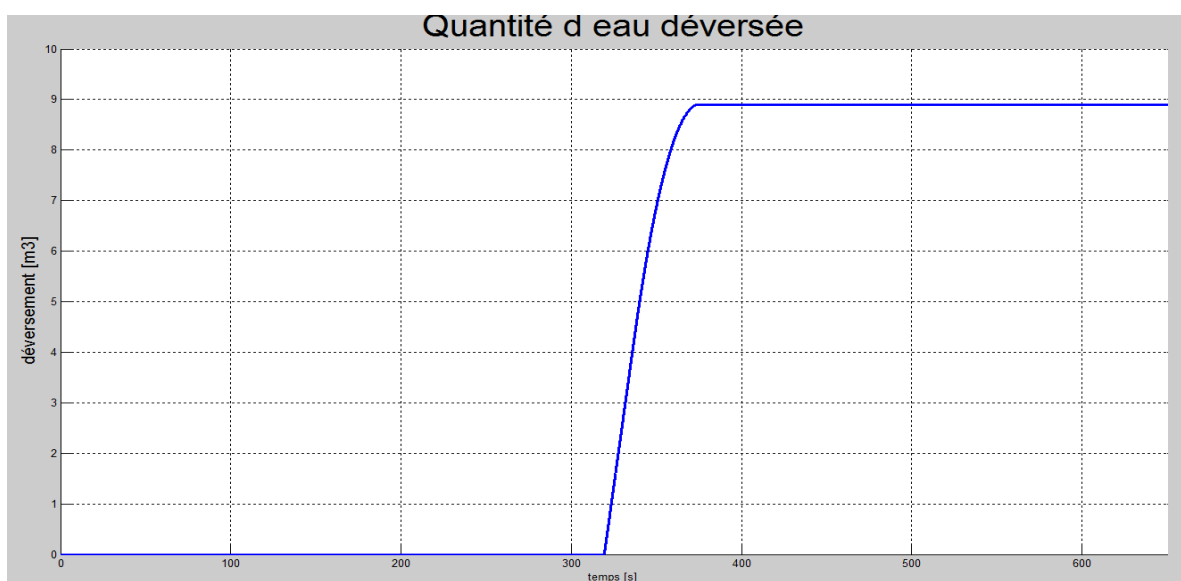


Figure 40 : déversement avec régulateur Pi sans anti-windup

Le dépassement de la consigne de niveau est dû au fait que la partie I du régulateur a continué à intégrer malgré le pointeau complètement fermé. Afin de remédier à ce problème, un « anti-windup » est ajouté sur la partie I du régulateur, ce qui est montré dans la figure 41 ci-dessous. Le gain de l' « anti-windup »,  $K_b$ , est de  $10^{-3}$ .

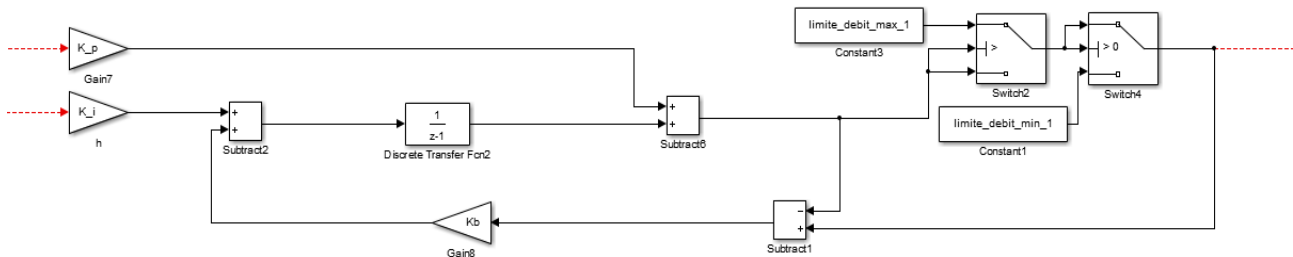


Figure 41 : Régulateur PI avec anti-windup et saturation

Le résultat de la simulation avec l' « anti-windup » est présenté dans la figure 42.

## Système avec « anti-windup »

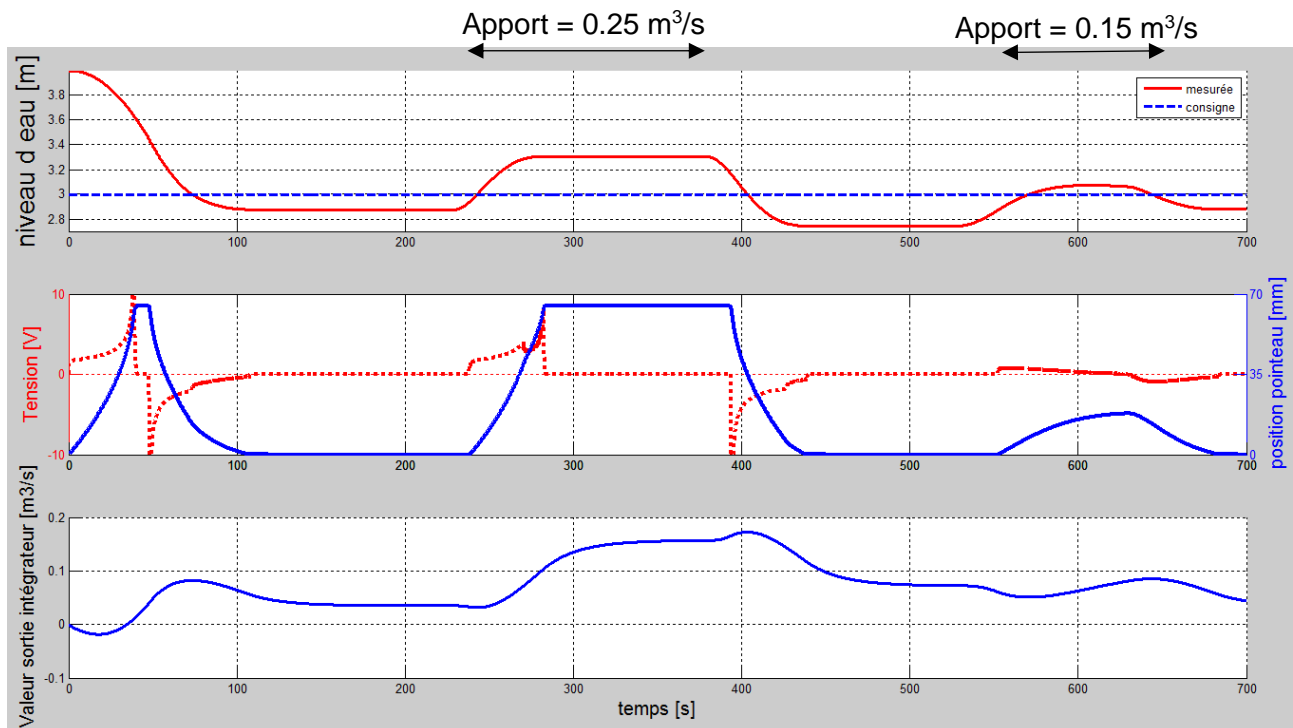


Figure 42 : Résultat régulation Pi avec anti-windup

La sortie de la partie intégratrice est plus faible que sans l' « anti-windup », maximum passant de 1 à 0.18, minimum passant de -0.8 à -0.02. Le bassin n'atteint plus sa hauteur maximale, il n'y a donc plus de déversement. L' « over-shoot » du niveau de la chambre de mise en charge est lui aussi diminué. Afin d'éliminer ce dépassement de consigne, une régulation PID est mise en place.

### 5.2.4 Régulation gain constant, filtre objectif

Comme mentionné précédemment, pour éviter un dépassement de la consigne de niveau, un régulateur PID est implémenté.

La fonction de transfert du régulateur est donc :

$$G(s) = K_p + K_i * \frac{1}{s} + K_d * s = \frac{K_p * s + K_i + K_d * s^2}{s}$$

Equation 38: FT régulateur PID

Les équations du système en boucle ouverte et en boucle fermée :

$$F_{OL} = K(s) * G(s) = \frac{m}{T * s^2 + s} * \left( \frac{K_p * s + K_i + K_d * s^2}{s} \right) = m * \frac{K_p * s + K_i + K_d * s^2}{T * s^3 + s^2}$$

Equation 39: FT système niveau PID en boucle ouverte

$$F_{CL} = \frac{K(s) * G(s)}{1 + K(s) * G(s)} = m * \frac{K_p * s + K_i + K_d * s^2}{T * s^3 + (1 + m * K_d) * s^2 + m * K_p * s + m * K_i}$$

Equation 40: FT du système niveau PI en boucle fermée

Comme pour le réglage « position », l'option choisie pour dimensionner les gains du régulateur est de le comparer à un filtre objectif.

Il suffit alors d'égaliser les dénominateurs de la fonction de transfert du filtre objectif et de la FT de notre système en boucle fermée.

$$F_{filtre} = \frac{K}{\left( 1 + a_1 * \frac{s}{\left( \frac{f_{g1}}{f_g} * \omega_g \right)} + b_1 * \frac{s^2}{\left( \frac{f_{g1}}{f_g} * \omega_g \right)^2} \right) * \left( 1 + a_2 * \frac{s}{\left( \frac{f_{g2}}{f_g} * \omega_g \right)} + b_2 * \frac{s^2}{\left( \frac{f_{g2}}{f_g} * \omega_g \right)^2} \right)}$$

Equation 41: FT filtre objectif ordre 4

La fonction de transfert étant du troisième ordre,  $b_1=0$ . Pour simplifier,  $f_{g1}/f_g = f_1$  et  $f_{g2}/f_g = f_2$ .

$$K_i = \frac{T * f_1 * f_2^2 * \omega_g^3}{m * a_1 * b_2} \quad K_p = K_i * \left( \frac{a_1}{f_1 * \omega_g} + \frac{a_2}{f_2 * \omega_g} \right)$$

$$K_d = \frac{(b_2 * f_1 + a_1 * a_2 * f_2) * m * K_i - f_1 * f_2^2 * \omega_g^2}{m * f_1 * f_2^2 * \omega_g^2}$$

Equation 42: Gains régulateur PID selon filtre objectif



### 5.2.5 Résultat pour gain constant selon filtre objectif, régulateur PID.

Le système est régulé selon les caractéristiques de la zone médiane de la chambre de mise en charge et un apport d'eau moyen.

Les valeurs suivantes ont été utilisées pour la simulation de régulation de niveau de la chambre de mise en charge.  $\omega_g$  est choisi égal à 2 fois la valeur absolue de la pente à laquelle se vide la zone médiane de la chambre de mise en charge, avec un débit de sortie moyen (soit 0.15 m<sup>3</sup>/s).

Constante de temps système, T	13	s
pente/saut indiciel, m	-0.1	m/(m <sup>3</sup> /s)
pulsation de coupure, $\omega_g$	0.015	rad/s
	66.7	s
Gain proportionnel, Kp	-1.0976	(m <sup>3</sup> /s)/m
Gain partie I, Ki	-0.0257	(m <sup>3</sup> /s)/m
Gain partie D, Kd	-8.384	(m <sup>3</sup> /s)/m

Figure 43 : Caractéristiques régulateur PID

## Système avec PID

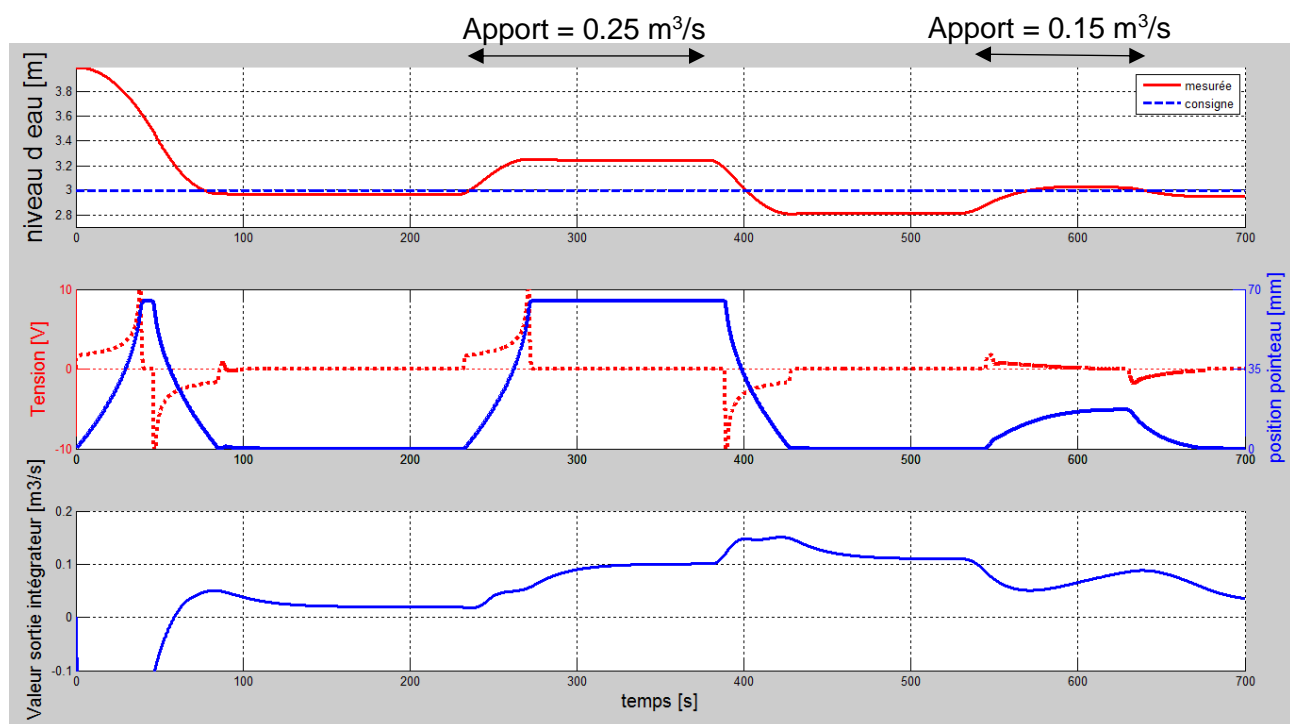


Figure 44 : Résultat avec régulateur PID

Avec une régulation PID, le dépassement de consigne n'est pas évité, mais il est diminué comparativement au système régulé avec un PI. Dans la première phase, où il n'y a pas d'apport, on part d'un bassin plein et on veut l'amener à un niveau de consigne. Avec le PI, on se stabilisait après env. 110 secondes à un niveau de 2.87m. Avec le PID, on se stabilise après env. 90 seconde à 2,97m.

Le gain  $K_i$  a été légèrement augmenté afin d'éliminer l'over-shoot, passant de -0.0257 à -0.024. Un apport avec des valeurs moins extrême survient. Comme le montre la figure 45, lorsqu'un changement du débit d'apport survient, le niveau d'eau varie légèrement avant que le régulateur ne parvienne à le ramener à la valeur de consigne.

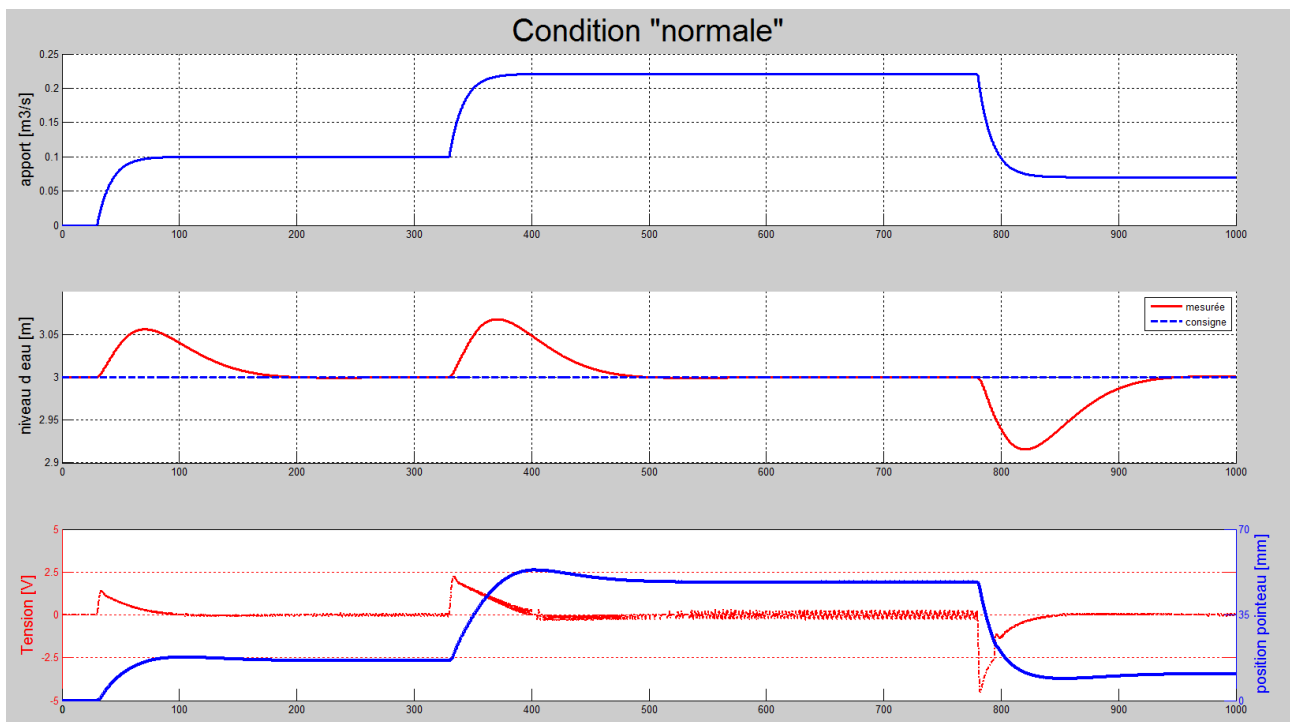


Figure 45 : Résultats avec PID, conditions « normales »

La figure 45 met aussi en évidence que la tension sur la vanne est très « bruitée » lorsqu'il y a un apport et que le niveau d'eau est proche de la consigne. Pour éviter ceci, un filtre du 1<sup>er</sup> ordre est ajouté sur la consigne du régulateur de position, le résultat est visible dans la figure 46.

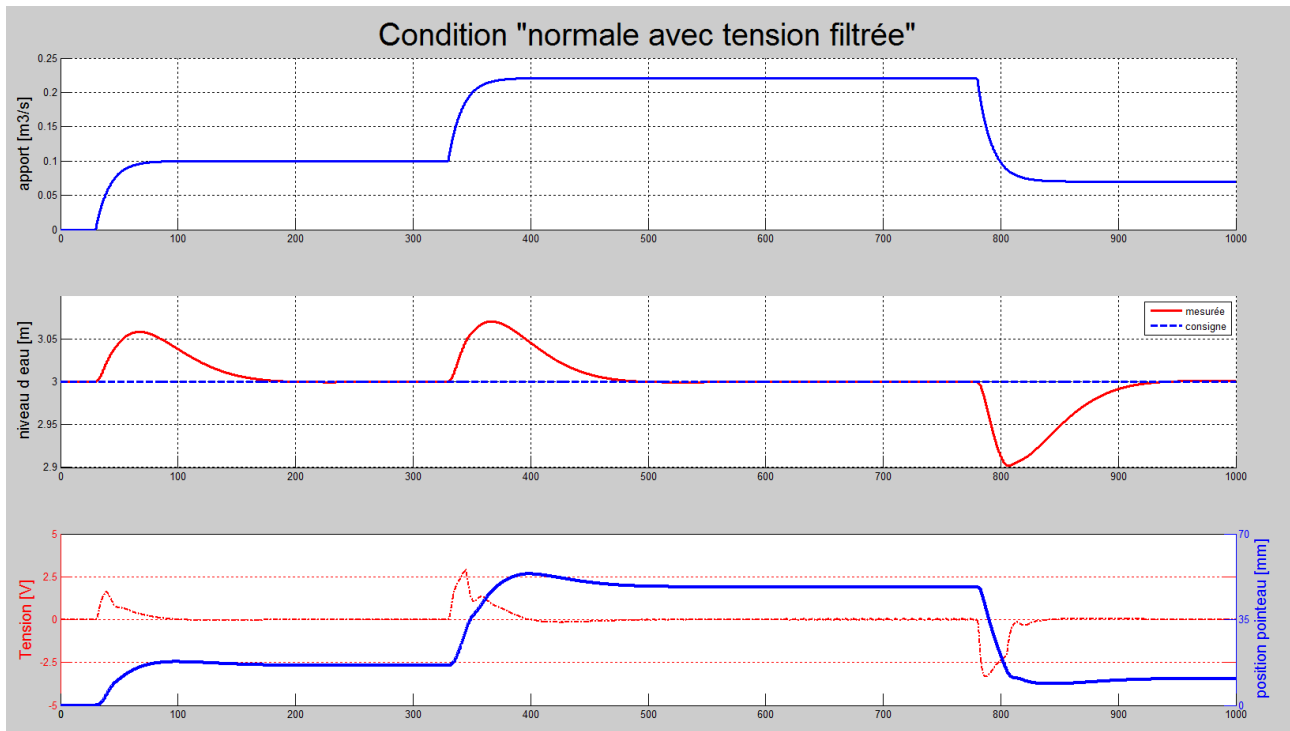


Figure 46 : Résultats avec PID, conditions « normales », tension filtrée

Jusqu'ici, la hauteur de consigne se trouvait dans la zone médiane de la chambre de mise en charge. Le niveau descendait de manière constante dans la partie juste avant cette consigne et après (+0.5m et -1.5m). Dès 1.5m la variation du niveau change (voir figure 12), ce qui peut poser problème selon la rapidité du régulateur.

Un test avec une consigne dans la zone inférieure de la chambre de mise en charge est effectué. La figure 47 ci-dessous montre le résultat de la régulation.

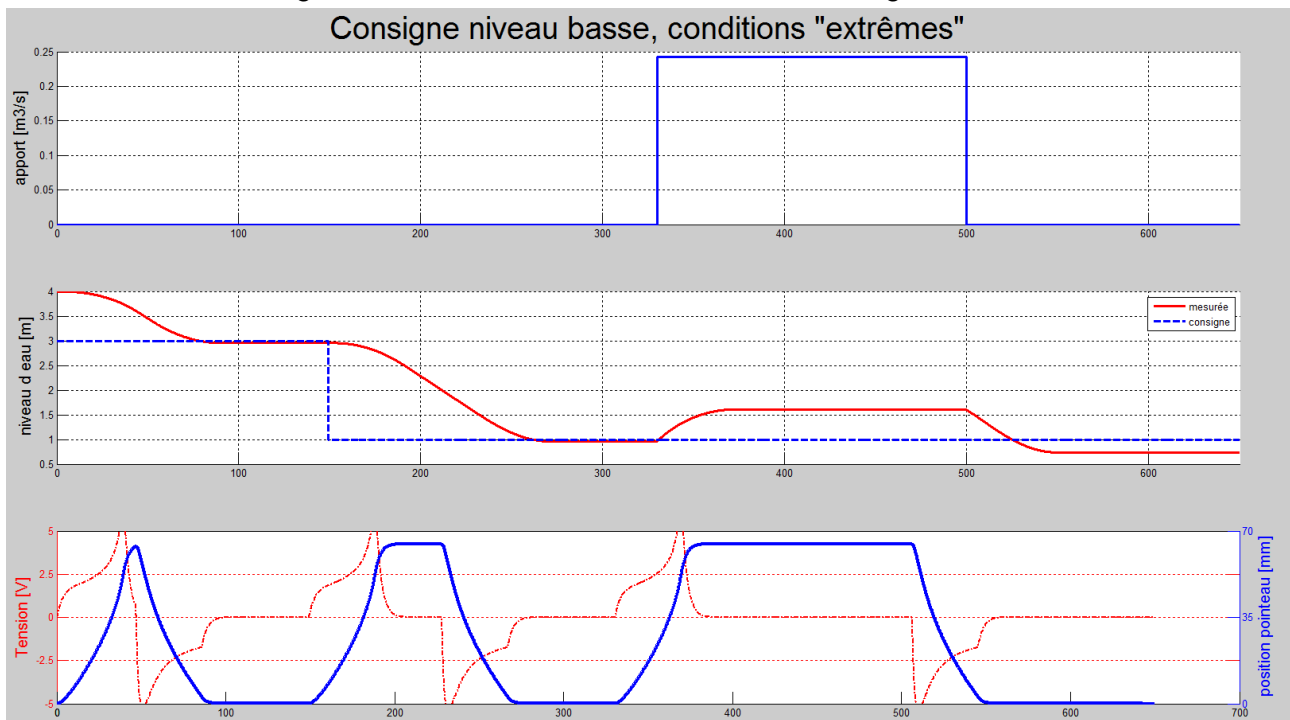


Figure 47 : Résultats avec PID, Conditions « extrêmes » et consigne basse

Le niveau d'eau se stabilise à la valeur de consigne, que celle-ci soit dans la zone médiane ou inférieure de la chambre de mise en charge. Avec une consigne de niveau à 1 mètre, le pire des cas, un arrêt soudain de l'apport d'eau risquerait de dénoyer la chambre de mise en charge. Le régulateur arrive cependant à fermer le pointeau assez rapidement afin que l'eau ne descende pas en dessous de 0.73 mètre.

Les gains du régulateur fonctionnent donc aussi bien dans la zone médiane de la chambre de mise en charge que dans la zone inférieure en forme de pyramide tronquée. Un régulateur avec gain adaptatif n'est donc pas nécessaire. Cette option a été dans un premier temps essayée, mais pas retenue pour la raison mentionnée juste avant.

## 6 CASCADE

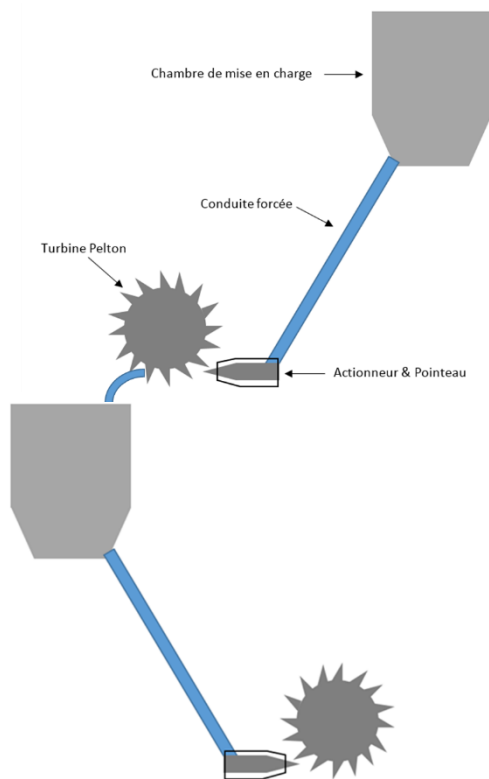


Figure 48 : représentation de la cascade de 2 étages.

Le principe d'une installation étagée en cascade est de mettre plusieurs systèmes à la suite.

Dans le cas présent, en se référant à la figure 1, le 1<sup>er</sup> étage correspond à une chute de 436m entre PCH n°1 et PCH n°2. Le 2<sup>ème</sup> étage, à une chute de 1050m entre PCH n°2 et PCH n°3.

A titre d'information et comme mentionné lors du travail de semestre cité dans le chapitre 3, Les différentes valeurs des pointeaux sont indiquées ci-dessous.

Désignations	Valeurs	Unités
Diamètre pointeau 1 <sup>er</sup> étage	58	mm
Course maximale pointeau 1 <sup>er</sup> étage	70	mm
angles des pointeaux	45	°
Diamètre pointeau 1 <sup>er</sup> étage	47	mm
Course maximale pointeau 1 <sup>er</sup> étage	56.7	mm

Figure 49 : Valeurs des pointeaux de la cascade

Le temps d'ouverture des pointeaux est fixé à 40 secondes, comme dans la régulation d'un étage.

Le minimum de déversement et aucun dénoyage ne doivent avoir lieu à tous les niveaux de la cascade.

## 6.1 Résultats d'une cascade de 2 étages

Ci-dessous, sont exposés les résultats de la régulation de deux étages. Des tests similaires à ceux effectués pour la régulation d'un étage sont réalisés.

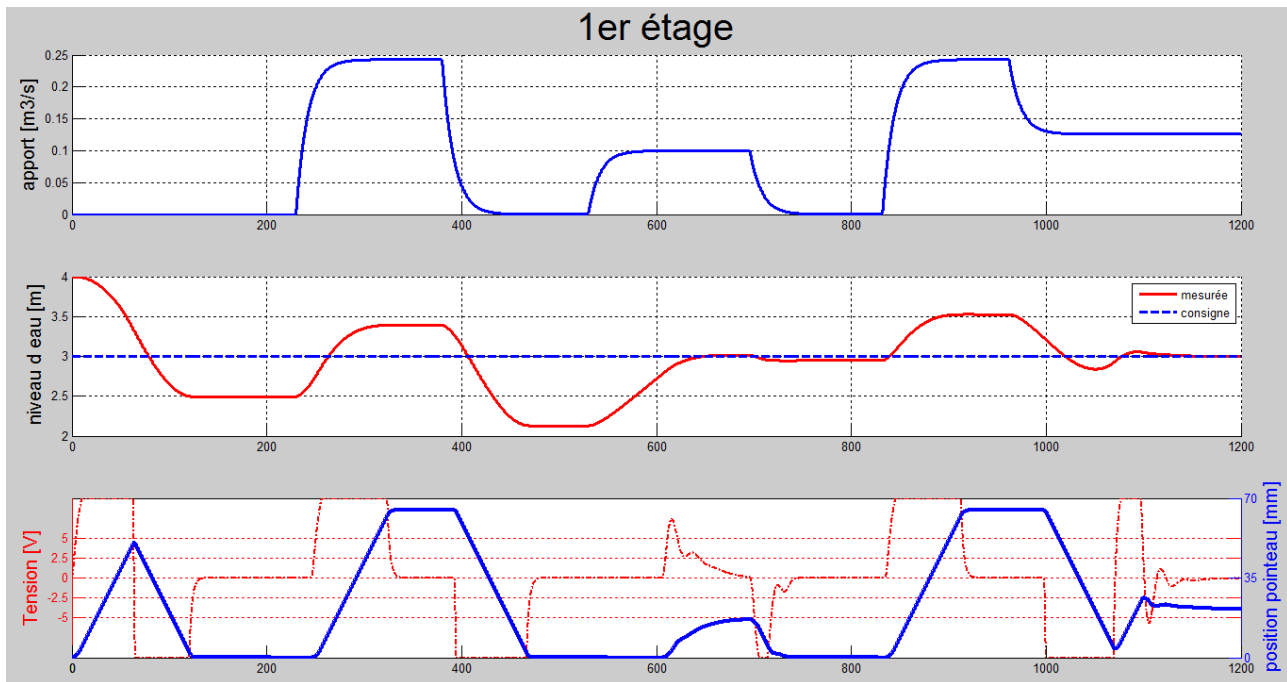


Figure 50 : Résultat de la régulation étagée, 1<sup>er</sup> étage

Les résultats pour le premier étage sont identiques à ceux de la régulation d'un étage seul (figure 44). Un cas critique a été testé : un apport d'eau maximum lorsque le niveau d'eau est égal à une valeur de consigne haute. La figure 50 montre que même dans cette situation, il n'y a pas de déversement.

Pour ce qui est du 2<sup>ème</sup> étage, l'apport d'eau est l'eau turbinée par le 1<sup>er</sup> étage. Celui-ci ayant l'aspect de l'ouverture du pointeau du 1<sup>er</sup> étage, il est facile de réguler le niveau du 2<sup>ème</sup> bassin.

Le niveau d'eau, pour autant que le débit ne soit pas maximum, se stabilise à la valeur de consigne, comme le montre la figure 51. Au début, jusqu'au temps 55, le niveau reste à 4 m, et il y a un petit déversement de 9 litres sur un laps de temps de 25 secondes, ce qui est négligeable. Sans communication entre les 2 étages, aucun déversement, ni de dénoyage apparaissent.

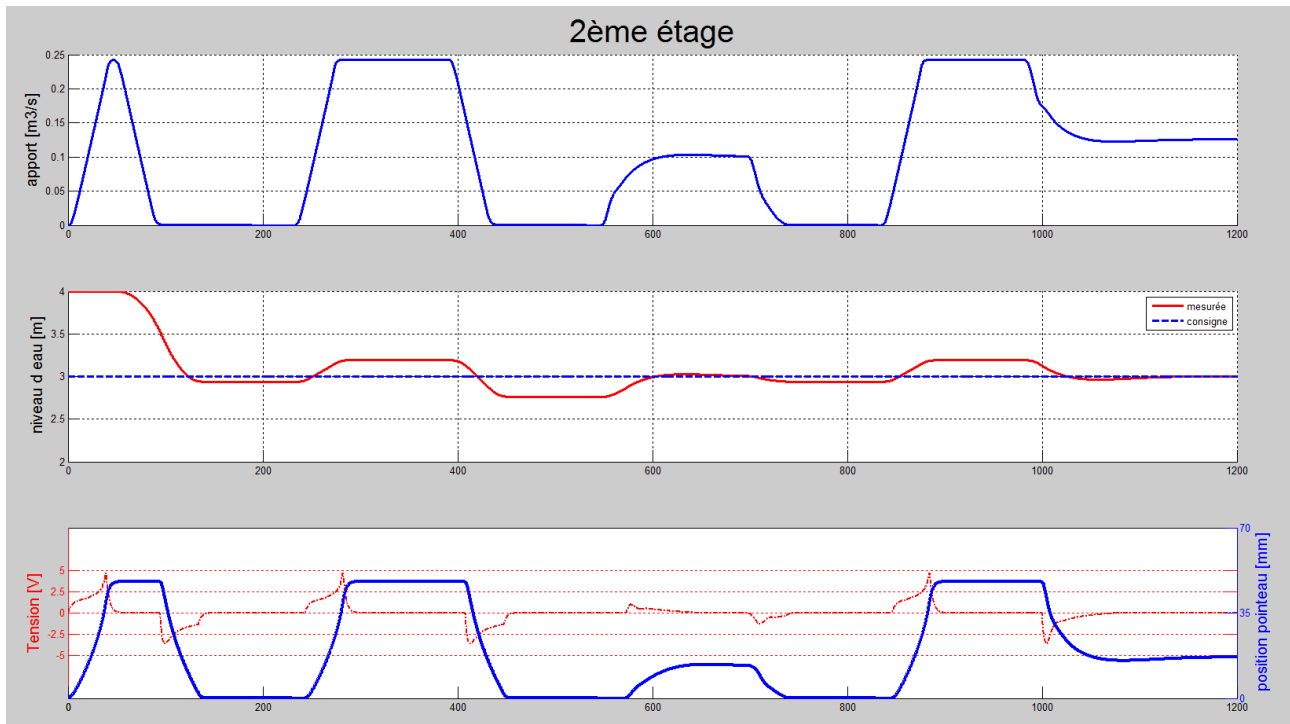


Figure 51 : Résultat de la régulation étagée, 2<sup>ème</sup> étage

Une situation imaginable est un arrêt d'urgence du premier étage. Cette opération aurait comme conséquence un arrêt net de de l'apport au 2<sup>ème</sup> étage, si l'on considère que l'eau déviée par le déflecteur ne rejoint pas la chambre de mise en charge. Le niveau de la chambre de mise en charge ne descend alors pas plus bas que 2.5 mètres.

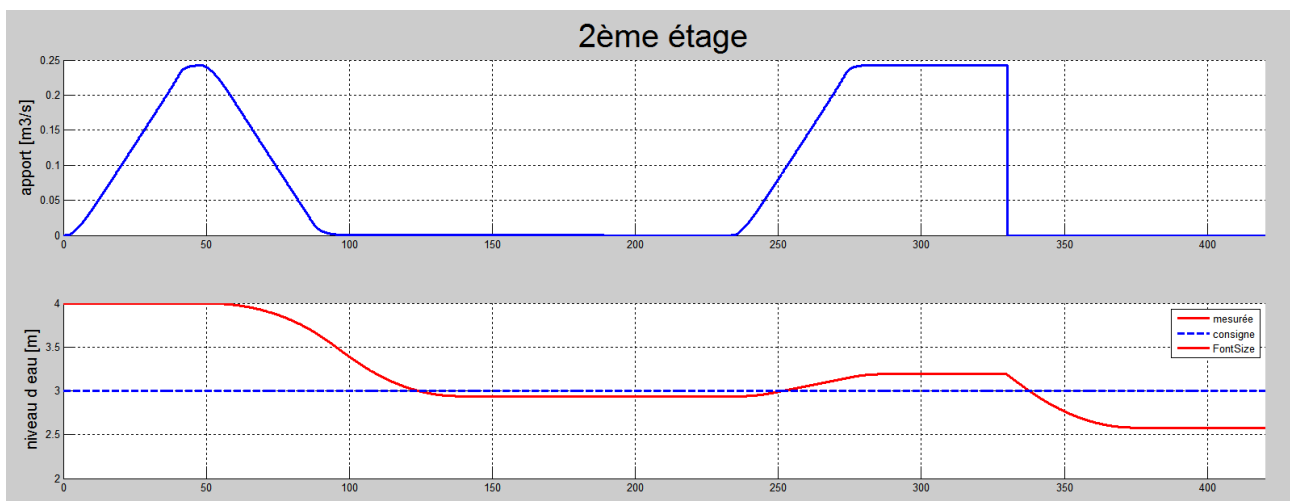


Figure 52 : Résultat 2<sup>ème</sup> étage avec arrêt d'urgence au premier étage

## 6.2 Cascade de 3 étages

L'ajout d'un étage similaire au 1<sup>er</sup> (436m de chute) comme 3<sup>ème</sup> étage, n'ajoute pas de problème. L'apport du dernier étage est l'eau turbinée par le 2<sup>ème</sup> étage. Les simulations montrent que les régulateurs arrivent à réagir à l'apparition ainsi qu'à la disparition d'un apport en eau des niveaux supérieurs. La figure 53 montre qu'il y a juste un décalage entre les apports des différents étages.

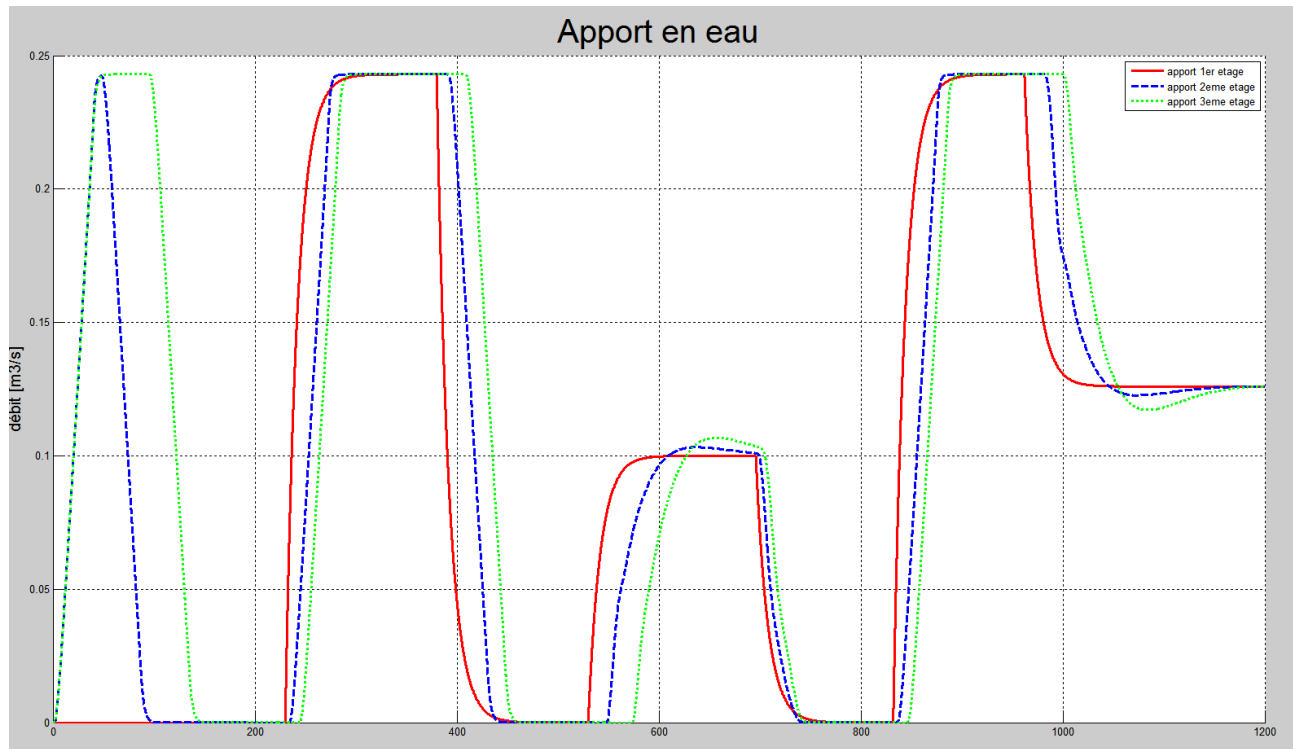


Figure 53 : apport en eau pour les 3 étages

Il serait théoriquement possible de mettre autant d'étages que désiré. La pratique ne nous le permet pas, afin d'avoir une puissance maximale, il faut avoir une grande chute et un débit maximum.

## 7 PUISSANCE DE L'INSTALLATION ETAGEE

Après avoir régulé le niveau des chambres de mise en charge, il est intéressant de savoir la puissance produite par l'installation.

La puissance hydraulique est donnée par l'équation suivante :

$$P_{Hydro} = Q_t * H_n * \rho * g$$

Equation 43 : Puissance hydraulique

Avec  $Q_t$  débit turbiné [m³/s],  $H_n$  la hauteur de chute [m].

Afin d'avoir un ordre de grandeur des puissances en jeu, les rendements sont pris comme étant constants, ce qui n'est pas réaliste. Le rendement varie selon le débit turbiné<sup>4</sup>.

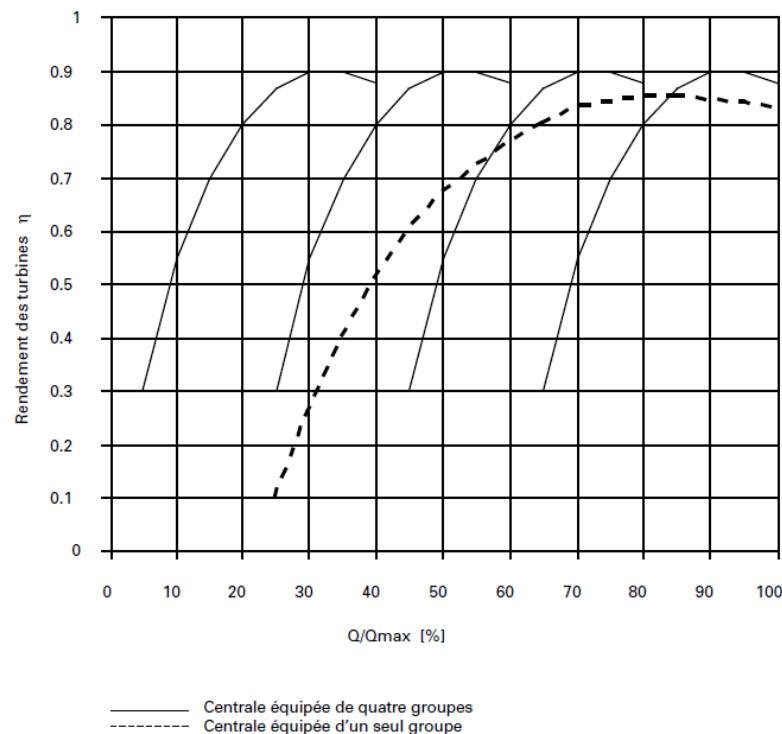


Figure 54 : rendement mécanique d'une turbine Pelton

La puissance mécanique équivaut à la puissance hydraulique avec un certain rendement des installations (force de frottement, pertes sous forme de bruit et de chaleur)

$$P_{mec} = P_{Hydro} * \eta_T$$

Equation 44 : Puissance mécanique

Le rendement mécanique est de l'ordre de grandeur de 84 à 90 %.

Pour avoir la puissance électrique il faut encore tenir compte du rendement du générateur qui est de 85 à 95%.

$$P_{elec} = P_{mec} * \eta_g$$

Equation 45 : Puissance électrique

Le débit maximum de l'installation est de 250l/min. Avec la première et la troisième chute de 436m, la deuxième de 1050m, la puissance maximum produite par la cascade de 3 étages peut être calculée.

$$\begin{aligned}
 P_{elec-tot} &= P_{elec-1} + P_{elec-2} + P_{elec-3} \\
 &= 0.84 * 0.85 * 9.81 * 1000 * 0.25 * (1050 + 2 * 436) = \mathbf{3'365kW}
 \end{aligned}$$

Equation 45 : Puissance électrique totale sur 3 étages

<sup>4</sup> Le dimensionnement et les essais de réception d'une mini-turbine, Programme d'action PACER – Energies renouvelables, Office fédéral des questions conjoncturelles



En partant avec un niveau égal à la hauteur de consigne pour chaque étage et avec un apport maximum (243 l/min), la puissance du 1<sup>er</sup> étage est représentée dans la figure 55.

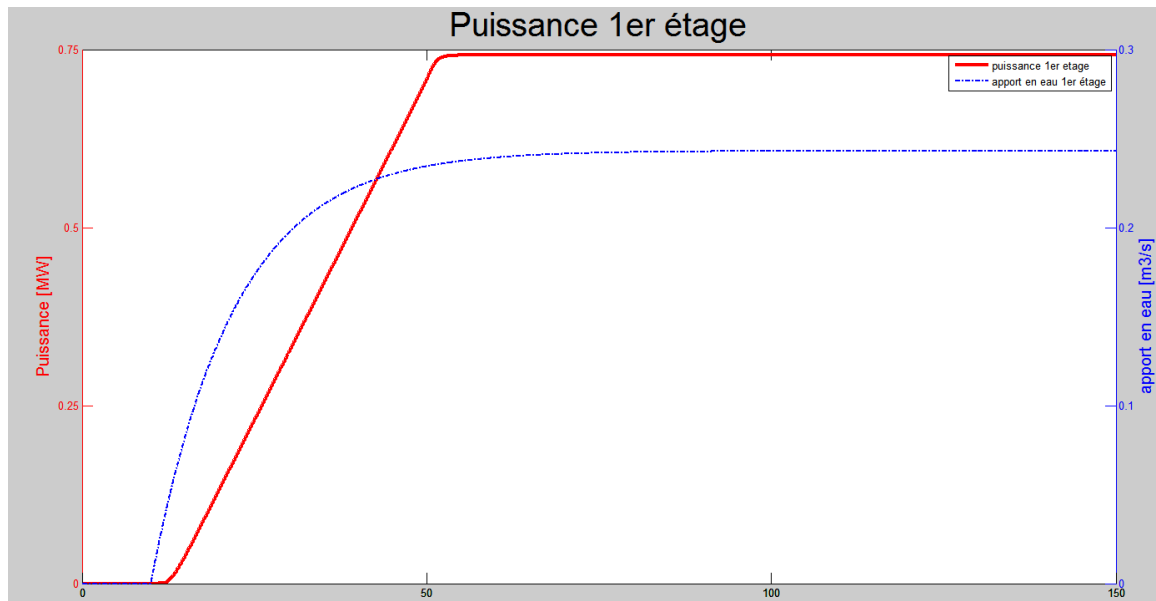


Figure 55 : Puissance et apport en eau du 1<sup>er</sup> étage

Ci-dessus, le graphique montre que la puissance du 1<sup>er</sup> étage est atteinte 44 secondes après le début de l'apport. Ce temps est 4 secondes plus élevé que la contrainte d'ouverture du pointeau. Ce retard est engendré par le système du 1<sup>er</sup> ordre qui filtre la consigne de position.

Le temps pour atteindre la puissance maximale de la cascade de 3 étages est représenté ci-dessous.

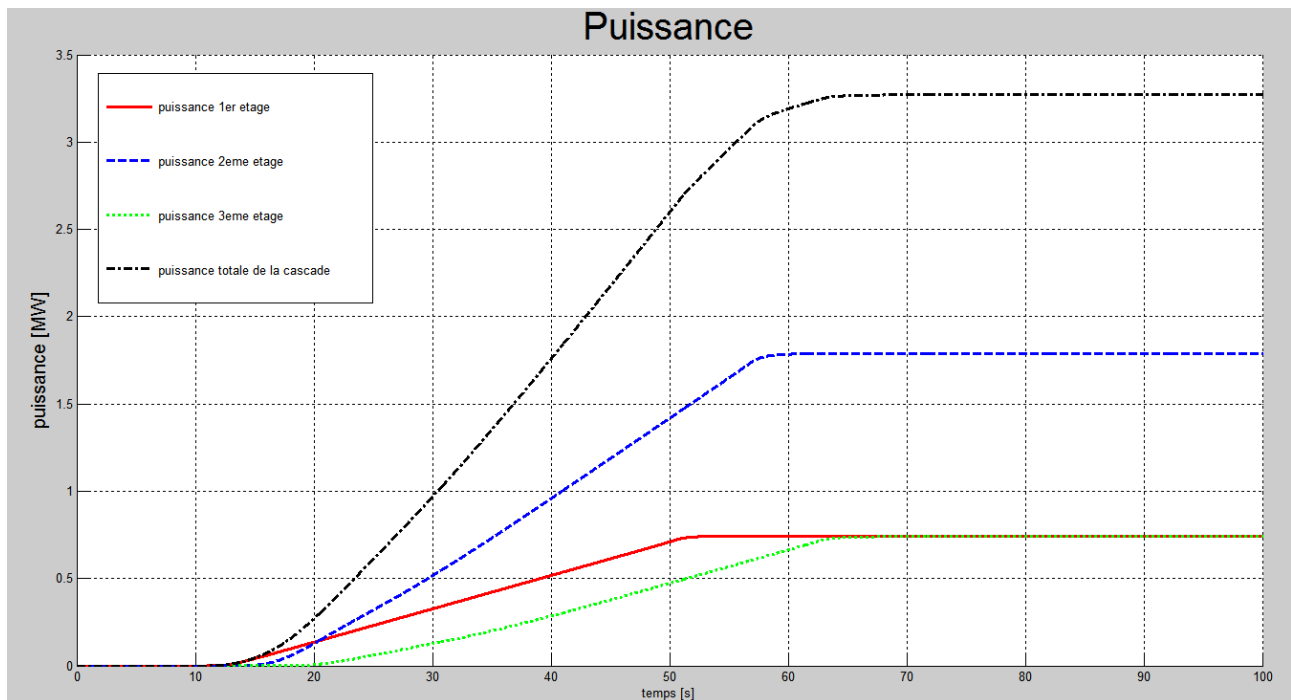


Figure 56 : Puissance des différents étages et de la cascade

La figure 56 montre que le temps pour atteindre la puissance maximale sur les 3 étages est d'environ 56 secondes. Ce temps pourrait être réduit en ouvrant les 3 pointeaux en même temps, dès l'arrivée de l'apport en eau. Il faudrait alors contrôler qu'il n'y ait pas de dénoyage de la mise en charge. En effet jusqu'à présent, le pointeau répondait à une arrivée d'eau alors que dans le cas présenté ici, l'apport arrivera après le début de l'ouverture.

Une diminution des valeurs de consigne de niveau des 3 chambres de mise en charge, au moment du début de l'apport (voir figure 55), permet l'ouverture des 3 pointeaux en même temps. Comparativement à la figure 56, la puissance des 3 étages ne présente aucun décalage dans le temps. La puissance maximale est donc atteinte en 44 secondes.

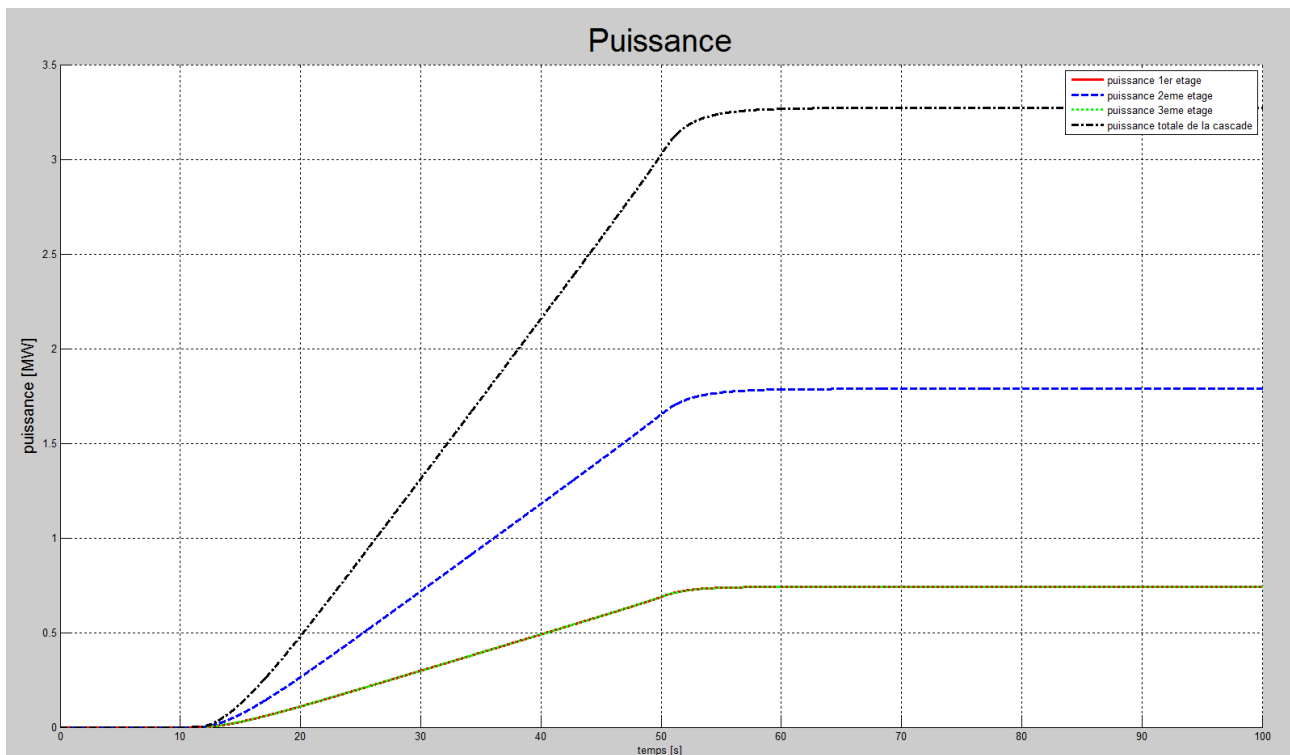


Figure 57 : Puissance des différents étages de la cascade, ouverture des 3 pointeaux en même temps.

Avec cette première ébauche sur les puissances, il serait envisageable de faire du service système vu la rapidité pour atteindre la puissance maximale. Un réglage secondaire, servant à ramener la fréquence du réseau à 50 Hz, pourrait être imaginé. Il serait nécessaire avant de pouvoir certifier la possibilité d'un tel réglage, de prendre plus connaissance des contraintes de ce service.

## 8 CONCLUSION

La modélisation d'une chambre de mise en charge a été effectuée, son comportement est cohérent avec les attentes. La variation du niveau d'eau est différente selon la hauteur de remplissage de la chambre. Celle-ci est représentée en fonction d'un apport d'eau constant.

Un modèle d'actionneur (vanne proportionnelle et piston) a été réalisé. L'ensemble des équations est exposé dans ce travail. Le fonctionnement de ce dernier est validé en comparaison avec un modèle utilisé par Hydro-Exploitation SA. Le temps d'ouverture limite du pointeau, avec une consigne sous forme de rampe, est respecté.

La régulation de position du pointeau a été effectuée. Le déplacement de ce dernier dépend de la tension appliquée aux bornes de la vanne proportionnelle. La position varie en fonction du débit dans la conduite forcée pour atteindre une valeur de consigne fixée par le régulateur de niveau. Le régulateur ne comporte qu'un gain proportionnel, son dimensionnement est fait par comparaison avec un filtre objectif.

La régulation de niveau de la chambre de mise en charge d'un étage a été réalisée. La consigne de débit (sortie du régulateur) varie en fonction de la différence entre la hauteur réelle du bassin et la valeur de consigne. Un régulateur PID permet d'éviter un over-shoot comparativement à un PI. Le dimensionnement du régulateur par comparaison avec un filtre objectif, permet de trouver les différents gains du régulateur. Un anti-windup est ajouté afin de limiter l'intégration et éviter un retard d'ouverture ou de fermeture du pointeau.

La cascade de plusieurs étages (2 puis 3) ne nécessite pas de communication entre les différents niveaux afin d'éviter le déversement d'eau ou le dénoyage des chambres de mise en charge.

La puissance maximale, variant selon le débit et la hauteur de chute, est atteinte après 56 secondes en ouvrant les pointeaux les uns après les autres. Il est possible de légèrement réduire ce temps à 44 secondes, en ouvrant les pointeaux en même temps. Ce dernier cas n'implique pas de dénoyage des chambres de mise en charge.

Une suite de ce projet pourrait être d'étudier la possibilité de faire du service système avec une telle installation. En prenant en compte les rendements en fonction du débit et les différentes contraintes liées aux réglages primaire, secondaire et tertiaire du réseau.

La production d'énergie électrique pourrait être étudiée, selon une planification prévue. La gestion d'eau dans les bassins devrait alors être prise en compte. Avec une participation au service système, le choix d'accepter ou non un déversement pourrait être différent, moyennant une rétribution de l'eau « perdue »

## 9 REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier M. Pierre-Olivier Moix, pour m'avoir suivi tout au long de ce travail, d'avoir répondu à mes questions et de m'avoir incité à pousser mes recherches.

Merci à M. Jonathan Lugon, d'Hydro-Exploitation, pour m'avoir fourni des informations sur les éléments d'une installation hydroélectrique et d'avoir pris du temps pour regarder le fonctionnement correct de ma régulation.

Je remercie également M Jean-Daniel Marcuard, pour le temps pris à répondre à toutes mes questions.

## 10 ANNEXES

Codes Matlab/Simulink :

- Détermination du système actionneur
- Détermination du système niveau avec un régulateur PI
- 1<sup>er</sup> étage avec régulateur PI
- Détermination du système niveau avec un régulateur PID
- 1<sup>er</sup> étage avec régulateur PID
- Cascade de 3 étages
- Puissance produite par une cascade de 3 étages

## 11 BIBLIOGRAPHIE

- [1] LOTH, Pierre. Aménagement Cleuson-Dixence : turbines et vannes sphérique pour l'usine de Bieudron. 10.03.2016. p. 174.
- [2] GAGNON, Tommy. MODÉLISATION CAUSALE ET ACAUSALE D'UN SYSTÈME ÉLECTRO-HYDRAULIQUE, MONTRÉAL, LE 2 NOVEMBRE 2011
- [3] MARCUARD, Jean-Daniel. Cours FET-AuR-Script S5 v2015.1 Fr, mad
- [4] Le choix, le dimensionnement et les essais de réception d'une mini-turbine, Programme d'action PACER – Energies renouvelables, 1995 Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne, août 1995.
- [5] DESBIENS, André. La commande automatique des systèmes dynamiques, Département de génie électrique et de génie informatique, Université Laval, 19 mars 2012.
- [6] LONGCHAMP, Roland. Commande numérique de systèmes dynamiques, Presses polytechniques et universitaire romandes, 1995
- [7] LUGON Jonathan, Rapport interne Hydro-Exploitation SA, Développement d'un régulateur position, 13.05.2014 (Confidentiel)