



**HAL**  
open science

# Limitation des pompages des convertisseurs électrohydrauliques : appareil de commande des servomoteurs réglant des organes d'admission vapeur

Thomas Rimbault

► **To cite this version:**

Thomas Rimbault. Limitation des pompages des convertisseurs électrohydrauliques : appareil de commande des servomoteurs réglant des organes d'admission vapeur. Génie mécanique [physics.class-ph]. 2014. dumas-01699167

**HAL Id: dumas-01699167**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01699167>**

Submitted on 2 Feb 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS**

**PARIS**

---

**MEMOIRE**

**Présenté en vue d'obtenir le**

**DIPLOME d'INGENIEUR CNAM**

**SPECIALITE : MECANIQUE**

**OPTION : STRUCTURES ET SYSTEMES**

**Par**

**(RIMBAULT, Thomas)**

---

**LIMITATION DES POMPAGES DES  
CONVERTISSEURS ELECTROHYDRAULIQUES**

**(Appareil de commande des servomoteurs réglant  
des organes d'admission vapeur)**

**Soutenu le 16 décembre 2014**

---

**JURY : Mr VENIZELOS - Mr LEGAY - Mme ROULEAU - Mr LE FLOCH - Mr  
CADIOU**

**PRESIDENT : Mr VENIZELOS**

**MEMBRES : Mr VENIZELOS : Tuteur et responsable de la chaire de mécanique CNAM - Mr  
LEGAY : Professeur à la chaire de mécanique du CNAM - Mme ROULEAU : Professeur à la  
chaire de mécanique du CNAM - Mr LE FLOCH : Tuteur et ingénieur au pôle régulation –  
ALSTOM POWER SERVICE à La Courneuve (93) - Mr CADIOU : Responsable du service  
suivi maintenance turbine énergie – ALSTOM POWER SERVICE à La Courneuve (93)**



## **Remerciements**

Les résultats de cette étude ont été le fruit d'un travail long, harassant mais enrichissant. En effet, étant depuis peu arrivé dans le service, il m'a fallu acquérir beaucoup de connaissances afin de pouvoir traiter efficacement la problématique. Dans ce contexte je tiens à remercier mes deux collègues Dominique LE FLOCH et Loic ROMANET du pôle régulation ainsi que mon responsable Christophe CADIOU qui n'ont cessé de m'accompagner tout au long de ce projet en m'apportant leurs connaissances, leur réflexion et en faisant preuve de patience tout en me soutenant dans toutes mes initiatives.

Ce long projet m'a permis de réaliser l'importance de se coordonner et de travailler en équipe. En effet, il a fallu que je travaille en partenariat avec d'autres services, d'autres entités d'ALSTOM mais aussi avec le client EDF<sup>i</sup> afin de mener à bien mon étude. Je citerais nos équipes de mise en service turbine (Field service<sup>ii</sup>) et en particulier Mr BLAIVE qui m'a apporté ses connaissances et surtout permis de préparer au mieux nos essais en centrales électriques. Je saluerais également l'entité de P.A.C.<sup>iii</sup> qui m'a permis de réaliser mon étude numérique de l'appareil ainsi que les techniciens de notre plateforme hydraulique qui malgré la charge quotidienne ont pu réaliser différents essais qui ont permis de comprendre physiquement le comportement de l'appareil.

Au-delà de cette étude, ce projet est l'aboutissement d'un long parcours au CNAM entrepris il y a plus de 7 ans, je tiens donc à remercier tous les professeurs du CNAM dont les connaissances, la disponibilité et surtout cette maîtrise de l'enseignement qui leur permette de se mettre à niveau de chaque auditeur afin qu'il puisse assimiler toutes ces connaissances diverses et variées.

Je ne peux oublier ma famille et mes amis qui de par leur soutien moral m'a permis de tenir pendant ce long apprentissage qui demande beaucoup de volonté et de pugnacité et dont le seul moteur était de pouvoir accéder professionnellement à un métier valorisant et enrichissant.





## Table des matières

I. Préambule.....	1
II. Système étudié.....	2
1. L'environnement .....	2
a. La centrale électrique .....	2
b. La turbine à vapeur .....	3
c. La boucle de régulation générale .....	5
d. L'appareil dans son environnement .....	7
2. Descriptif et fonctionnement du CEH.....	9
a. Introduction.....	9
b. Le convertisseur électrohydraulique (CEH) .....	10
c. La boucle de position du tiroir de réglage .....	16
III. Description de la problématique de pompage des CEH.....	20
1. Constat en exploitation.....	20
2. Constat lors des essais de maintenance sur site.....	20
3. Constat lors des essais de maintenance en plateforme hydraulique.....	23
IV. Investigations .....	23
1. Essais entrepris sur le site de CATTENOM tranche 4.....	23
a. Objectif .....	23
b. Liste des paramètres enregistrés .....	24
c. Essai 1 : Comportement en statique et en boucle ouverte du CEH .....	24
d. Essai 2 : Comportement en statique, dynamique et en boucle fermée du CEH.....	27
e. Conclusion .....	28
2. Essais entrepris sur le site de PENLY tranche 2 .....	28
a. Objectif .....	28
b. Condition initiale avant essais .....	29
c. Descriptif des essais .....	29

# MEMOIRE D'INGENIEUR CNAM PARIS

## LIMITATION DES POMPAGES DES CONVERTISSEURS ELECTROHYDRAULIQUES

---

d.	Constatation .....	30
e.	Conclusion .....	31
f.	Remarque sur les critères PIS .....	31
3.	Comparaison des différents types de CEH sur le palier P'4 (turbine 1300MW).....	31
a.	Introduction.....	31
b.	CEH BP.....	31
c.	CEH HP-BP REC70 .....	32
d.	Analyse .....	32
V.	Modélisation et simulation numérique.....	32
1.	Introduction .....	32
a.	But.....	32
b.	Périmètre de la modélisation.....	33
c.	Processus de la modélisation .....	35
2.	Descriptif du système modélisé.....	36
d.	Modélisation de l'étage manostatique .....	37
e.	Modélisation des pilotes de servomoteur.....	40
f.	Modélisation de la boîte à diaphragmes.....	41
g.	Modélisation de la carte RBP et du conditionneur LVDT.....	42
h.	Modélisation de l'ensemble transducteur, 1 <sup>er</sup> étage et 2 <sup>ème</sup> étage du CEH.....	45
3.	Validation statique du modèle.....	46
a.	Calage transducteur/1 <sup>er</sup> étage/2 <sup>ème</sup> étage .....	47
b.	Calage du tiroir de réglage (T2) via le ressort (R3) et les forces de frottement ....	48
c.	Calage de la douille manostatique (T1) via le ressort (R1) et les forces de frottement.....	50
d.	Vérification du modèle complet.....	52
4.	Validation dynamique du modèle .....	54
a.	Vérification de la carte RBP : Consigne = mesure .....	54
b.	Vérification de la réponse sur un statique.....	55

# MEMOIRE D'INGENIEUR CNAM PARIS

## LIMITATION DES POMPAGES DES CONVERTISSEURS ELECTROHYDRAULIQUES

---

c. Vérification de la réponse en dynamique.....	57
5. Simulation .....	58
a. Forces de frottement .....	58
b. Diaphragme d'alimentation .....	59
c. Lumière de réglage .....	60
d. Action intégrale (I).....	61
e. Action proportionnelle (P) .....	62
VI. Solutions proposées.....	63
1. Optimisation des systèmes installés .....	63
a. Réglages du régulateur de la boucle de position.....	63
b. Fonctionnement hydromécanique .....	63
2. Remplacement des systèmes installés .....	67
a. Le régulateur de la boucle de position .....	67
b. Remplacer l'appareil .....	67
VII. Annexes .....	68
VIII. Liste des figures et des tableaux .....	80
IX. Résumé – Summary .....	82
1. Résumé .....	82
2. Summary .....	83
X. Glossaire.....	84



## **I. Préambule**

Les centrales E.D.F. de CATTENOM<sup>iv</sup>, GOLFECH<sup>v</sup> & PENLY<sup>vi</sup> rencontrent depuis plusieurs années des problèmes d'instabilité au niveau des organes de commande des servomoteurs qui manoeuvrent les organes d'admissions haute pression de la vapeur dans la turbine. Ces organes de commande sont appelés « convertisseurs électrohydrauliques »; ce sont des appareils essentiels à la régulation des turbines. Ces instabilités prennent la forme d'oscillations appelées « pompage ». Ces oscillations entraînent le pompage de la puissance générée par le groupe turbo-alternateur.

Problématique : Quel est l'origine de ce pompage ?

Objectif : Ce sujet vise donc à identifier l'origine de ce phénomène afin de pouvoir le supprimer ou le limiter à un niveau acceptable.

## II. Système étudié

### 1. L'environnement

#### a. La centrale électrique

Le fonctionnement d'une centrale électrique peut être expliqué simplement de la façon suivante :

➤ *Le but*

Produire de l'électricité.

➤ *Les moyens*

- L'alternateur (A) doit être mis en rotation pour pouvoir produire de l'électricité.
- Afin de mettre en rotation l'alternateur (A) nous avons besoin d'une turbine (B) en amont qui elle aussi doit être en rotation. Ces deux machines une fois accouplées sont appelées GTA<sup>vii</sup>.
- Pour pouvoir mettre en rotation une turbine il nous faut en amont une énergie provenant d'un fluide. Ce fluide sera de la vapeur pour les turbines que l'on étudie. Cette vapeur est créée par une source chaude, la chaudière (C) dont l'énergie utilisée pour chauffer l'eau peut être aussi bien fossile (Fioul, charbon, gaz) que nucléaire.
- Afin de boucler le cycle eau/vapeur une source froide (D) pouvant être la mer, la rivière ou un bassin d'eau refroidi par l'atmosphère viendra condenser (E) la vapeur grâce au condenseur situé à l'échappement de la turbine.

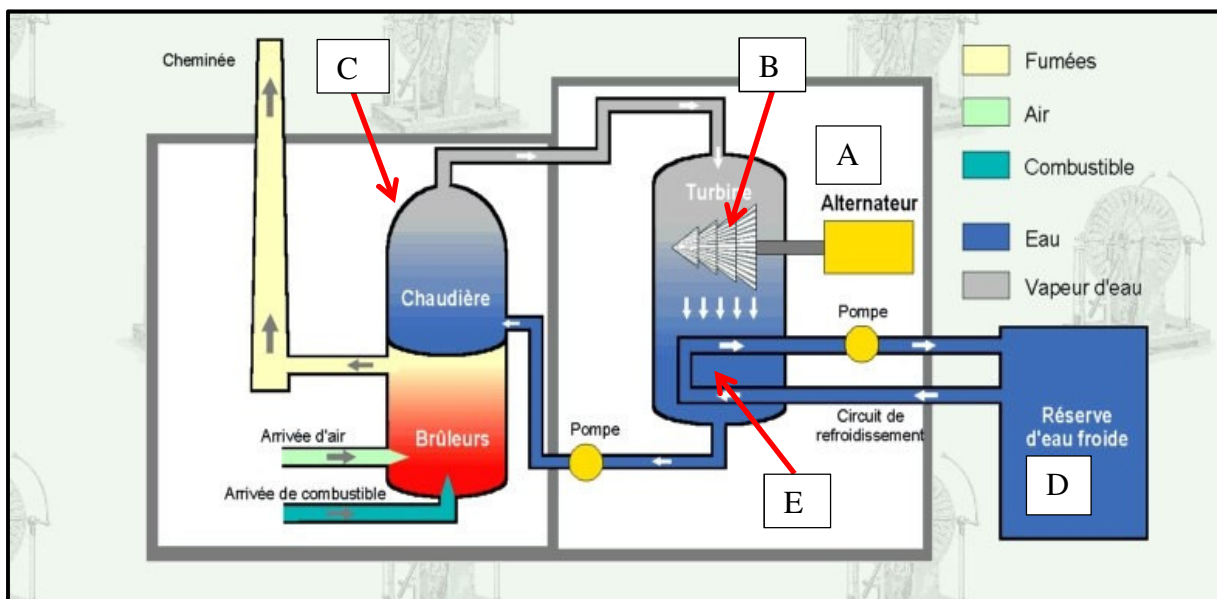


Figure 1 : La centrale électrique

## b. La turbine à vapeur

### ➤ *Principe*



**Figure 2 : Turbine à vapeur de 1300 MW**

La turbine à vapeur est un moteur alimenté par un fluide dont une partie de l'énergie est transformée grâce aux aubages de la turbine en énergie mécanique transmise au rotor. Son principe est de mettre en rotation une ligne d'arbre qui accouplée à l'alternateur va pouvoir mettre en rotation celui-ci.

### ➤ *Fonctionnement*

Pour fonctionner la turbine à vapeur doit disposer, en amont, d'une source chaude, qui fournit à l'admission turbine de la vapeur dans des conditions de pression et température conférant au fluide une énergie thermodynamique élevée.

En effet, l'énergie cinétique transportée par la vapeur va se transformer en énergie mécanique grâce aux aubages (ailettage) et ainsi entrainer en rotation le rotor et donc la turbine.

En aval une source froide qui permet d'avoir des conditions de température et pression à l'échappement de la turbine permettant l'écoulement de la vapeur dans la turbine et généralement sa condensation.



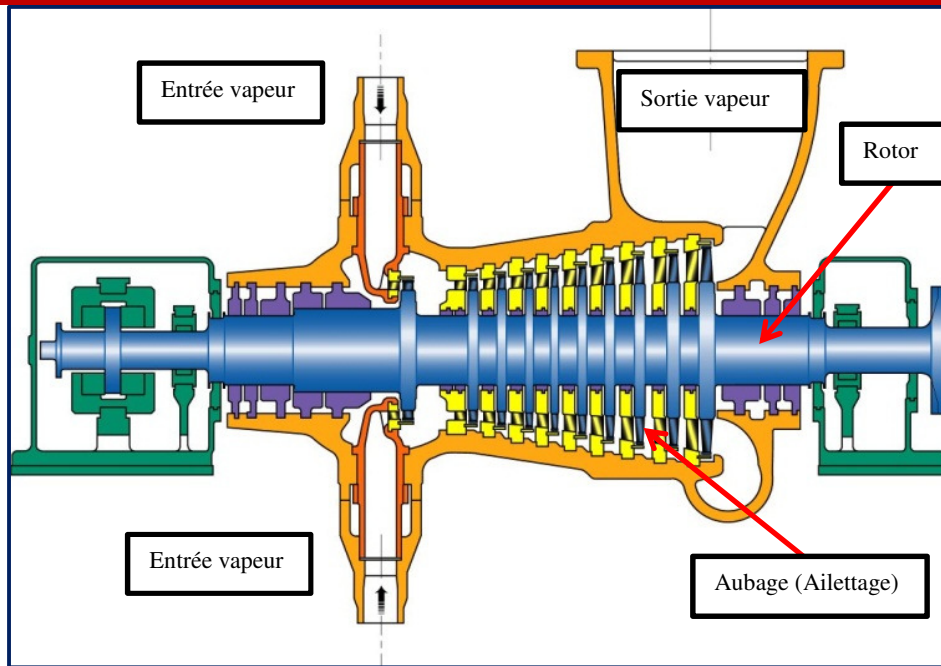


Figure 3 : Schéma de principe d'une turbine à vapeur, corps haute pression

Généralement, pour des questions de rendement et des questions économiques, le cycle du fluide est fermé. La vapeur est condensée et ramené de la source froide (condenseur) à la source chaude (chaudière) par des pompes. Des réchauffeurs alimentés par de la vapeur prélevée de la turbine permet de réchauffer l'eau avant son entrée dans le générateur de vapeur.

c. La boucle de régulation générale

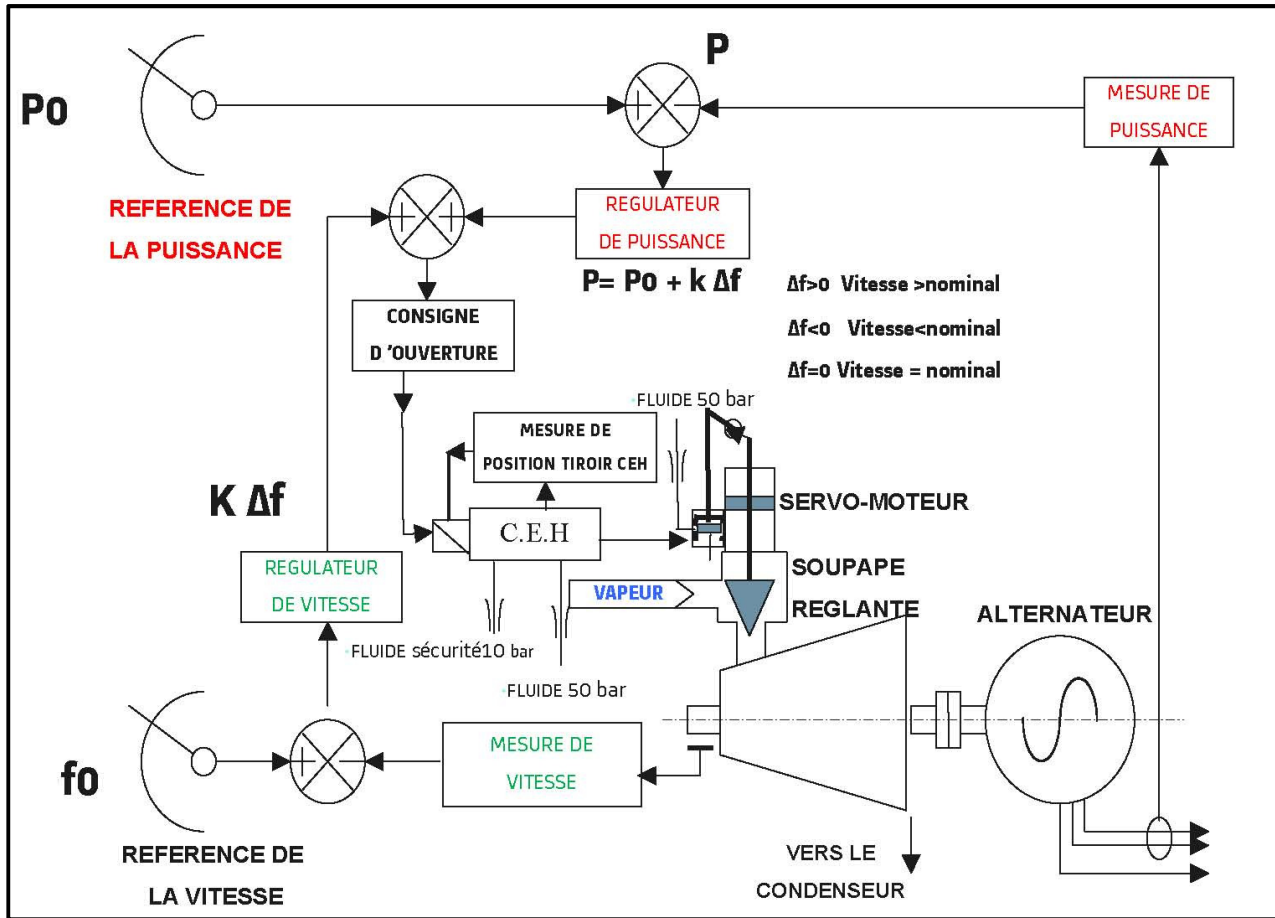


Figure 4 : Schéma de base de la régulation de puissance et de vitesse du groupe turbo-alternateur

➤ *Principes fondamentaux*

L'idée principale est que dans n'importe quelle phase d'exploitation, la sécurité de la machine l'emporte toujours sur toute autre demande : marche à vide, en îlotage<sup>viii</sup> ou en exploitation sur le réseau.

Trois principes fondamentaux régissent l'exploitation de la turbine :

- Permettre à tout instant le contrôle de la vitesse et de la puissance de la machine.
- Assurer la sécurité de la machine en toute circonstance.
- Avoir un système fiable et donc disponible.

Les deux systèmes auxiliaires « Régulation » et « Sécurité » sont conçus pour respecter ces principes fondamentaux.

➤ *La régulation*

Ce circuit permet de contrôler la vitesse et la puissance de la machine, cela revient en fait à contrôler de façon très fine la quantité de vapeur qui traverse la turbine. Cette fonction est assurée par des organes de réglage du débit de vapeur entrant : les soupapes de réglages.

Une interface homme/machine permettra de fixer les consignes nécessaires au bon fonctionnement. En effet, un niveau ou un seuil devra t'être calibré afin de transformer ces consignes en ordre d'ouverture des soupapes et de s'assurer que les ordres transmis permettent d'atteindre les consignes de fonctionnement désirées.

Les turbines à vapeur sont équipées de deux types d'organes vapeur :

- Les vannes d'arrêt, qui sont des organes de sectionnement fonctionnant en tout ou rien.
- Les soupapes de réglages dont l'ouverture peut être pilotée et par conséquent réguler le débit vapeur.

L'ouverture et la fermeture de ces organes est assurée par des servomoteurs hydrauliques, eux-mêmes commandés par des systèmes de commande électrohydrauliques, permettant de vaincre les forces de pression auxquelles sont soumis les clapets des organes. Ils sont situés en amont de la machine ou des corps de turbine.

➤ *Types de régulation des soupapes de réglages*

Selon leur conception, les structures des systèmes de régulation sont dits centralisées ou décentralisées.

Décentralisée : La pression de réglage des servomoteurs des organes d'admission vapeurs de réglage est générée individuellement pour chacun des servomoteurs par des appareils électrohydrauliques situés sur ou à proximité des servomoteurs.

Centralisée : La pression de réglage des pilotes de servomoteurs réglants est commune pour tous les servomoteurs et est générée par deux appareils en parallèle recevant la même consigne du système de régulation turbine.

d. L'appareil dans son environnement

➤ Environnement hydraulique

Après ce descriptif général, nous pouvons introduire le contexte de l'étude. En effet, l'appareil appelé convertisseur électrohydraulique (CEH<sup>ix</sup>) que nous allons étudier est intégré dans une régulation type centralisée. L'appareil pilote les organes d'admission de la vapeur haute pression de la turbine. Le schéma ci-dessous permet de visualiser l'appareil dans son environnement.

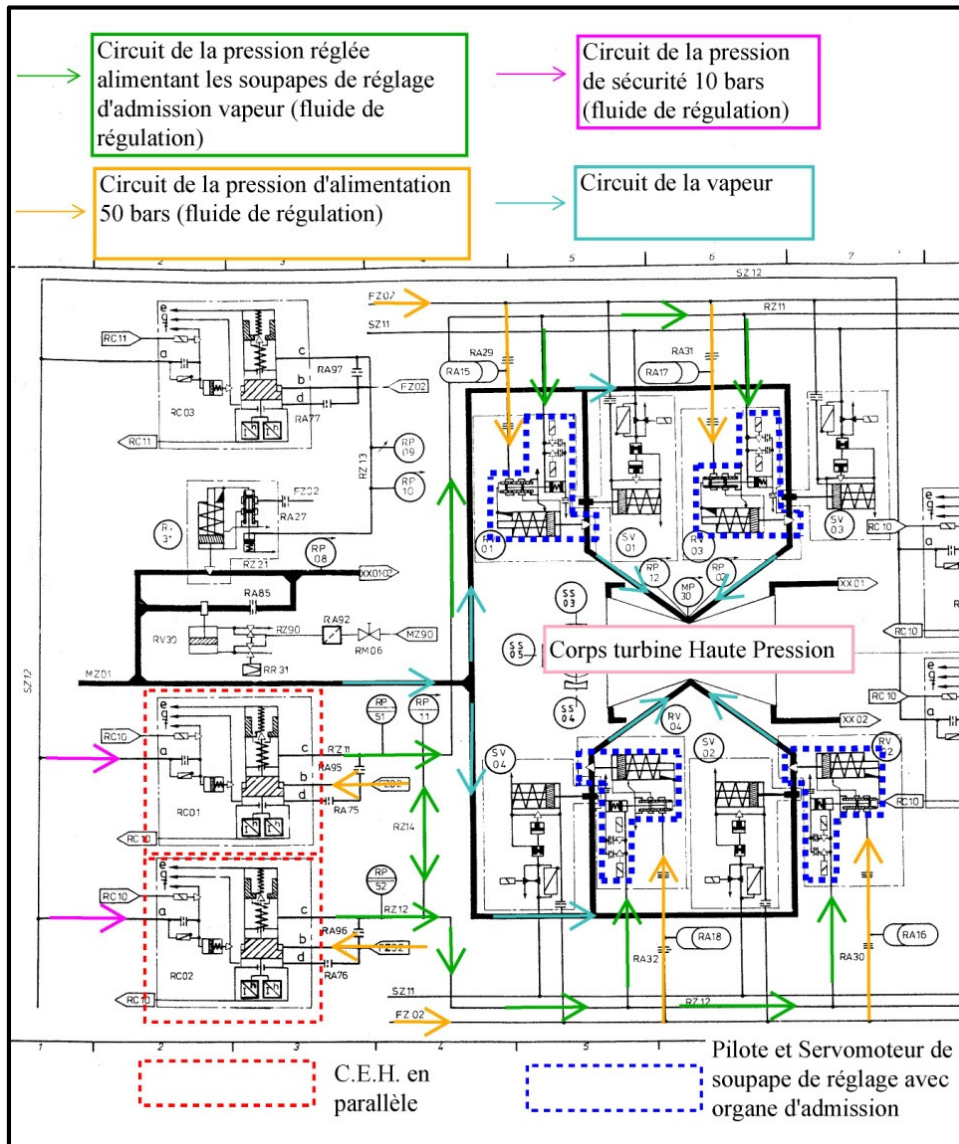


Figure 5 : CEH et leur environnement hydraulique

Les CEH à partir d'un circuit d'alimentation 50bars (en orange sur la Figure 5 ci-dessus) et d'un circuit de sécurité 10bars (en rose sur la Figure 5 ci-dessus) règle une pression de commande (pression réglée, en vert sur la Figure 5 ci-dessus) des servomoteurs des soupapes de réglage.

➤ *Environnement électronique*

La partie régulation électronique est indépendante de l'appareil et du fonctionnement de la régulation hydraulique. En effet, les cartes de régulation sont situées dans des armoires de commande, elles-mêmes situées dans un local électrique dédié. Le CEH et sa mesure de position vont permettre de réaliser l'interface entre les deux régulations.

Le type de régulation électronique utilisé dans notre étude est communément appelé « MICROREC ». La spécificité de cette installation est que l'on peut commuter automatiquement les CEH sur défauts. En effet, lorsque l'un des deux appareils a un dysfonctionnement quelconque, la régulation le ferme.

Par conséquent, cette mise en défaut nécessite que le 2<sup>ème</sup> CEH en parallèle puisse commander non plus deux servomoteurs mais les quatre servomoteurs, manœuvrant ainsi les quatre organes d'admission de réglage haute pression de la turbine.

2. Descriptif et fonctionnement du CEH

a. Introduction

Ci-dessous l'appareil étudié (CEH) et sa mesure de position qui comprend un capteur de position ainsi qu'un convertisseur déplacement/intensité.

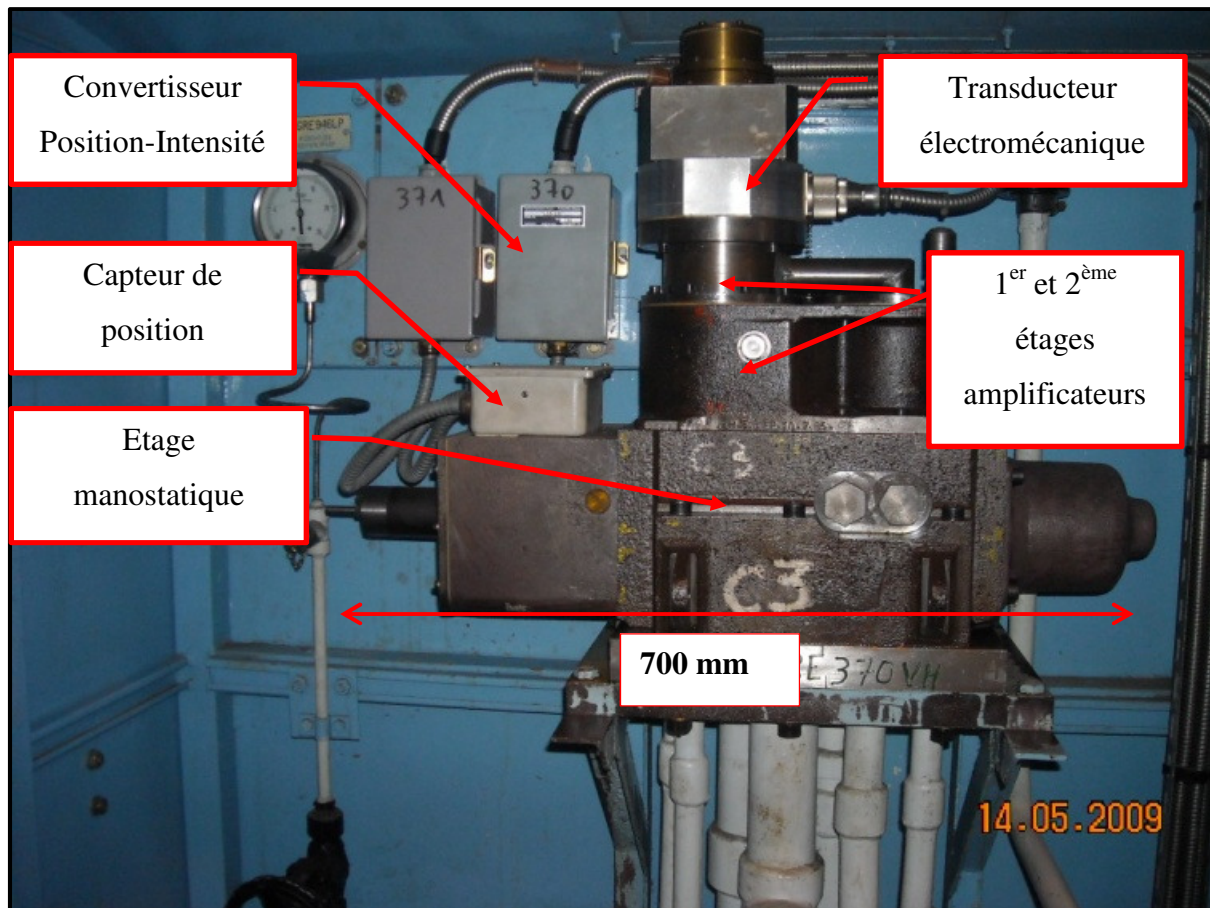


Figure 6 : Photo d'un CEH sur site



b. Le convertisseur électrohydraulique (CEH)

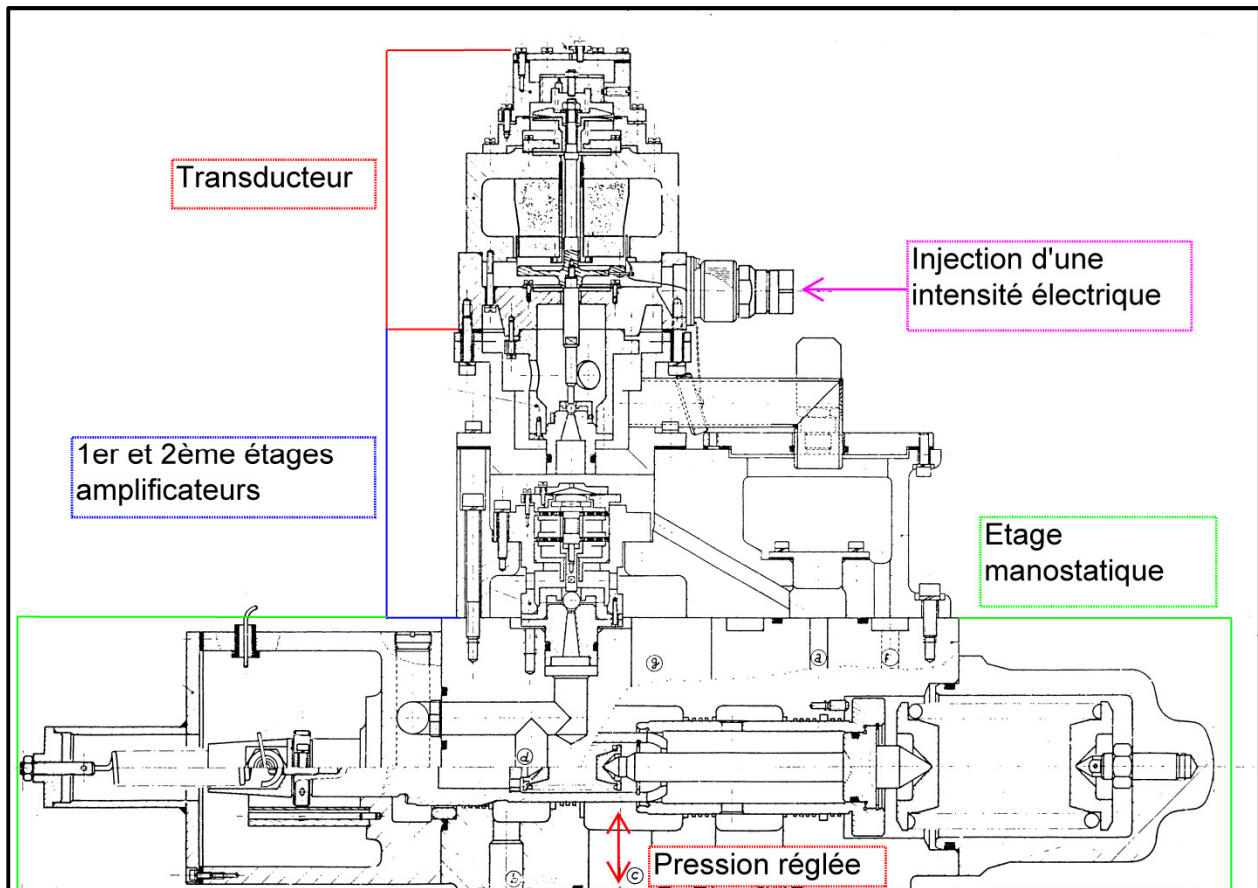


Figure 7 : Plan d'un convertisseur électrohydraulique

Historique : D'après les différentes archives dont j'ai pu bénéficier, cet appareil a été conçu de manière empirique. L'étage manostatique est inspiré du CEH type AS74 utilisé sur le palier P4 (Centrale EDF de PALUEL) et la partie du système qui permet de transformer la grandeur électrique en une pression hydraulique (transducteur et 1<sup>er</sup> étage) a été modifiée en ajoutant une partie amplificatrice supplémentaire (2<sup>ème</sup> étage) afin d'amplifier la consigne électrique.

Cette conception a été validée suite à des essais en usine puis des essais sur site en 1987.

Principe : Le convertisseur électrohydraulique assure la conversion d'une intensité électrique en pression hydraulique appelée pression réglée. Cette conversion s'effectue via un transducteur Intensité/Force, une succession de deux étages amplificateurs Force/Pression, et d'un convertisseur Pression/Déplacement/Pression (étage manostatique).

➤ *Le transducteur*

Principe : Cet élément électromécanique sert à transformer une intensité électrique en une force mécanique. Il est composé :

- d'un ensemble magnétique, fixe, composé d'un aimant, d'un anneau polaire et d'un corps ;
- d'un ensemble bobine/poussoir, mobile, composé d'une bobine, d'un support bobine et d'un poussoir.

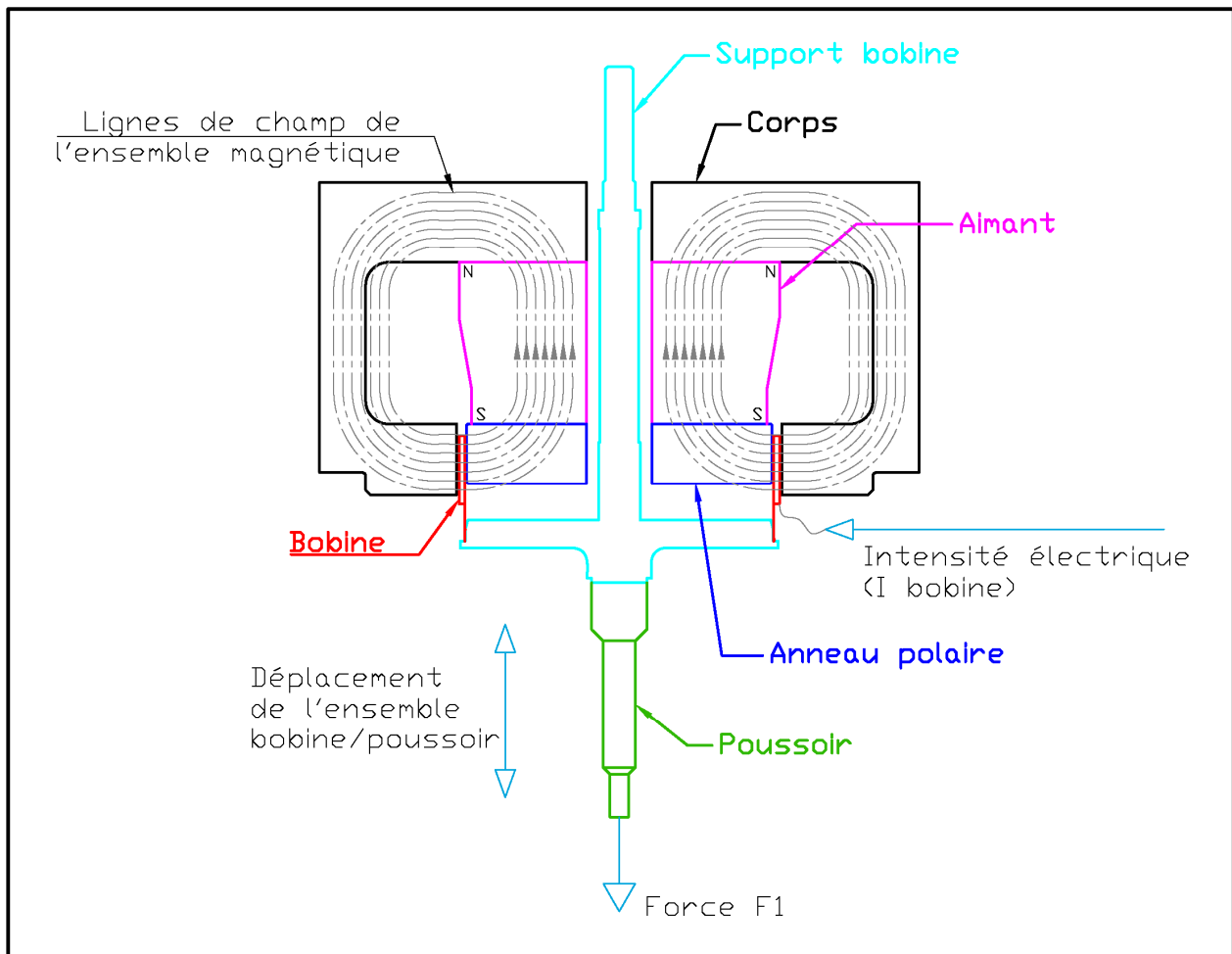


Figure 8 : Schéma fonctionnel du transducteur

Fonction : Lorsque la bobine est parcourue par une intensité électrique ( $I$  (bobine)), il se crée un champ magnétique qui s'oppose au champ de l'ensemble magnétique fixe.

L'opposition de ces deux champs génère une force  $F_1$  en bout de poussoir :  $F_1 = f(I \text{ (bobine)})$

Cette force est une fonction linéaire de l'intensité électrique.



➤ *1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> étages amplificateurs*

Principe : Ces deux éléments vont permettre de transformer la force  $F_1$  en bout de poussoir en une pression hydraulique puis d'amplifier celle-ci. Cette transformation/amplification s'effectue à travers deux ensembles clapet sphérique montés en séries. Chaque ensemble est constitué d'une bille et d'un orifice de section bien définie. Le 1<sup>er</sup> ensemble appartient au 1<sup>er</sup> étage alors que le 2<sup>ème</sup> ensemble appartient au 2<sup>ème</sup> étage. Ces 2 ensembles sont reliés par à une membrane.

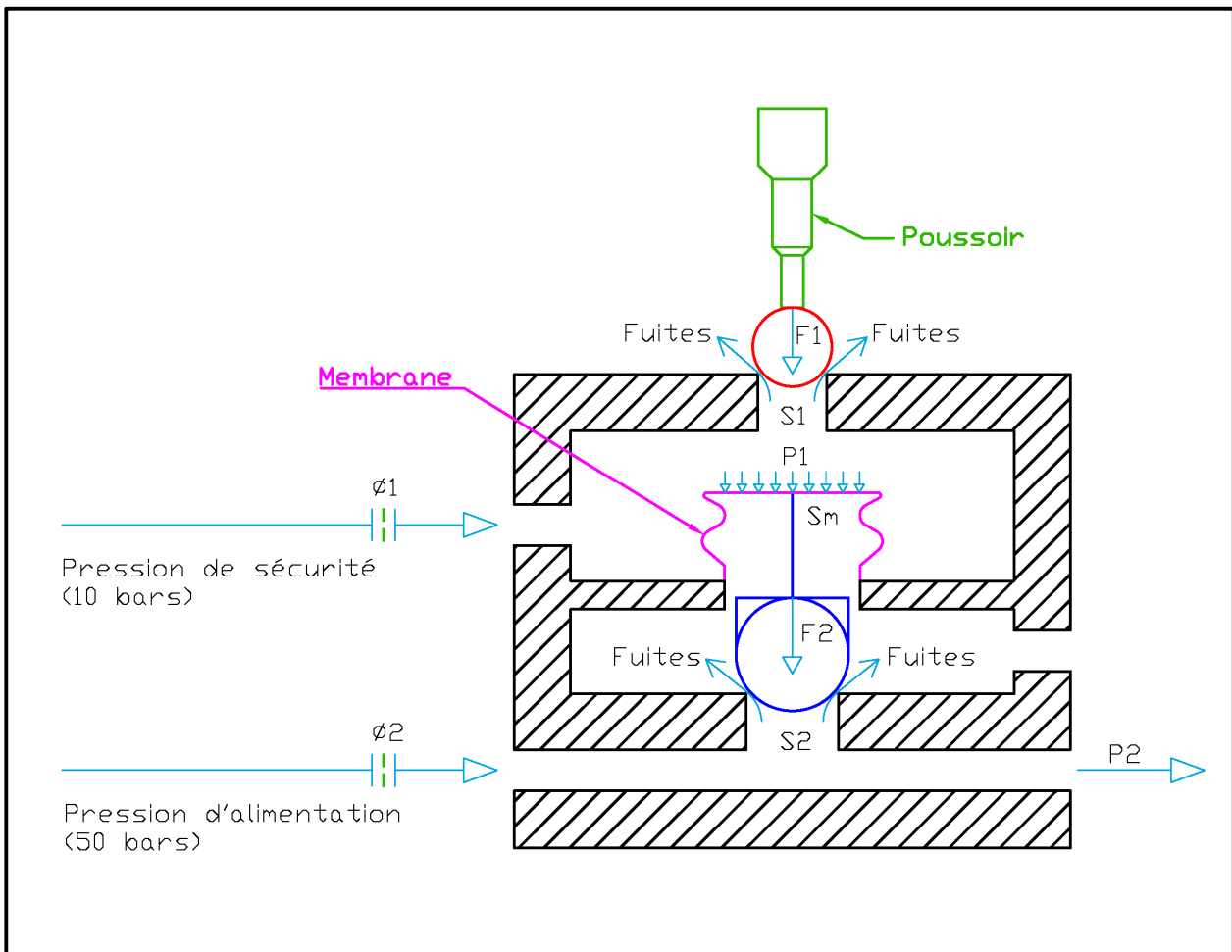


Figure 9 : Schéma fonctionnel 1er et 2ème étage

Fonction : Le 1<sup>er</sup> étage transforme la force  $F_1$  générée par le transducteur en une pression de fluide  $P_1$ . La pression  $P_1$  est ensuite transformée en une force  $F_2$  par la membrane du 2<sup>ème</sup> étage (Section  $S_m$ ). Le 2<sup>ème</sup> étage va ainsi générer une pression de fluide  $P_2$ .

Le gain de cet ensemble résulte du choix des sections  $S_1$ ,  $S_m$  et  $S_2$ .

Remarque : L'alimentation hydraulique du 1<sup>er</sup> étage est assurée par le circuit de sécurité (10bars) par l'intermédiaire d'un diaphragme ( $\Phi_1$ ). L'alimentation hydraulique du 2<sup>ème</sup> étage est assurée par le circuit d'alimentation (50bars) par l'intermédiaire d'un diaphragme ( $\Phi_2$ ). (Voir Figure 5 : CEH et leur environnement hydraulique)

➤ *L'étage manostatique*

Principe : L'étage manostatique permet de transformer la pression  $P_2$  (en sortie du 2<sup>ème</sup> étage) en une pression appelée « Pression réglée ou  $P_R$  », par l'intermédiaire d'un tiroir de réglage et d'une douille manostatique.

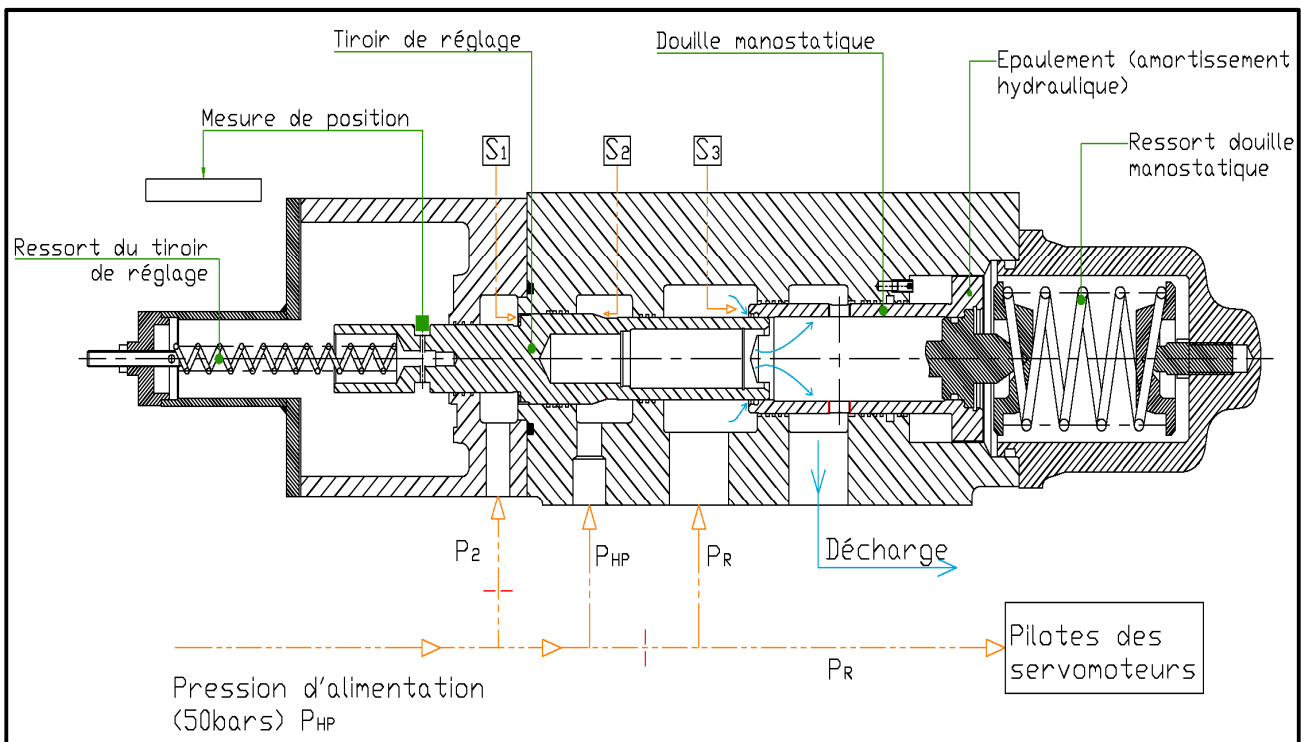


Figure 10 : Schéma fonctionnel de l'étage manostatique

Fonction :

L'ensemble tiroir de réglage/douille manostatique permet d'ajuster une section de passage (lumière de réglage). Cette section de passage fait office de décharge du circuit « Pression réglée » de façon à régler la pression de ce circuit.

La position du tiroir est donnée par :

- la pression  $P_2$  sur la section  $S_1$  (force vers la droite) ;
- la pression  $P_{HP}$  (50bars) sur la section  $S_2$  (force vers la gauche) ;
- la force du ressort du tiroir de réglage (force vers la gauche) ;
- la force de frottement (en statique, opposée à la résultante des 3 forces ci-dessus ; en dynamique, opposée au mouvement).

L'équation caractéristique du mouvement du tiroir de réglage peut être écrite sous la forme suivante :  $P_2 \cdot S_1 - P_{HP} \cdot S_2 - k_t(\Delta x_t) - F_{t_{frot}} = m_t \cdot a_t$

Avec,

$P_2$  : Pression exercée sur le tiroir de réglage provenant du 2<sup>ème</sup> étage

$S_1$  : Section active du tiroir où la pression  $P_2$  vient s'appliquer

$P_{HP}$  : Pression exercée sur le tiroir de réglage provenant du circuit d'alimentation (50bars)

$S_2$  : Section active du tiroir où la pression  $P_{HP}$  vient s'appliquer

$k_t$  : Raideur du ressort de traction du tiroir de réglage avec  $\Delta x_t$ , la flèche du ressort

$F_{t_{frot}}$  : Forces de frottement exercées sur le tiroir de réglage

$m_t$  : Masse du tiroir de réglage

$a_t$  : Accélération du tiroir de réglage

La position de la douille manostatique est donnée par :

- la pression réglée  $P_R$  sur la section  $S_3$  (force vers la droite) ;
- la force du ressort de la douille manostatique (force vers la gauche) ;
- la force de frottement (en statique, opposée à la résultante des 2 forces ci-dessus ; en dynamique, opposée au mouvement) ;
- la force d'amortissement hydraulique (la douille manostatique comporte côté ressort un épaulement offrant une section active dans un alésage rempli de fluide à pression atmosphérique. Le jeu entre l'épaulement de la douille et l'alésage est le seul passage permettant le transfert du fluide entre les deux chambres. Cette forme de construction

réalise un amortissement hydraulique actif lors des mouvements rapides de la douille manostatique).

L'équation caractéristique du mouvement la douille manostatique peut être écrite sous la forme suivante :  $P_R \cdot S_3 - k_d(\Delta x_d) - F_{d_{\text{frot}}} + C_{vd} = m_d \cdot a_d$

Avec,

$P_R$  : Pression réglée exercée sur la douille manostatique

$S_3$  : Section active de la douille manostatique où la pression  $P_R$  vient s'appliquer

$k_d$  : Raideur du ressort de la douille manostatique avec  $\Delta x_d$ , la flèche du ressort

$F_{d_{\text{frot}}}$  : Forces de frottement exercées sur la douille manostatique

$m_d$  : Masse la douille manostatique

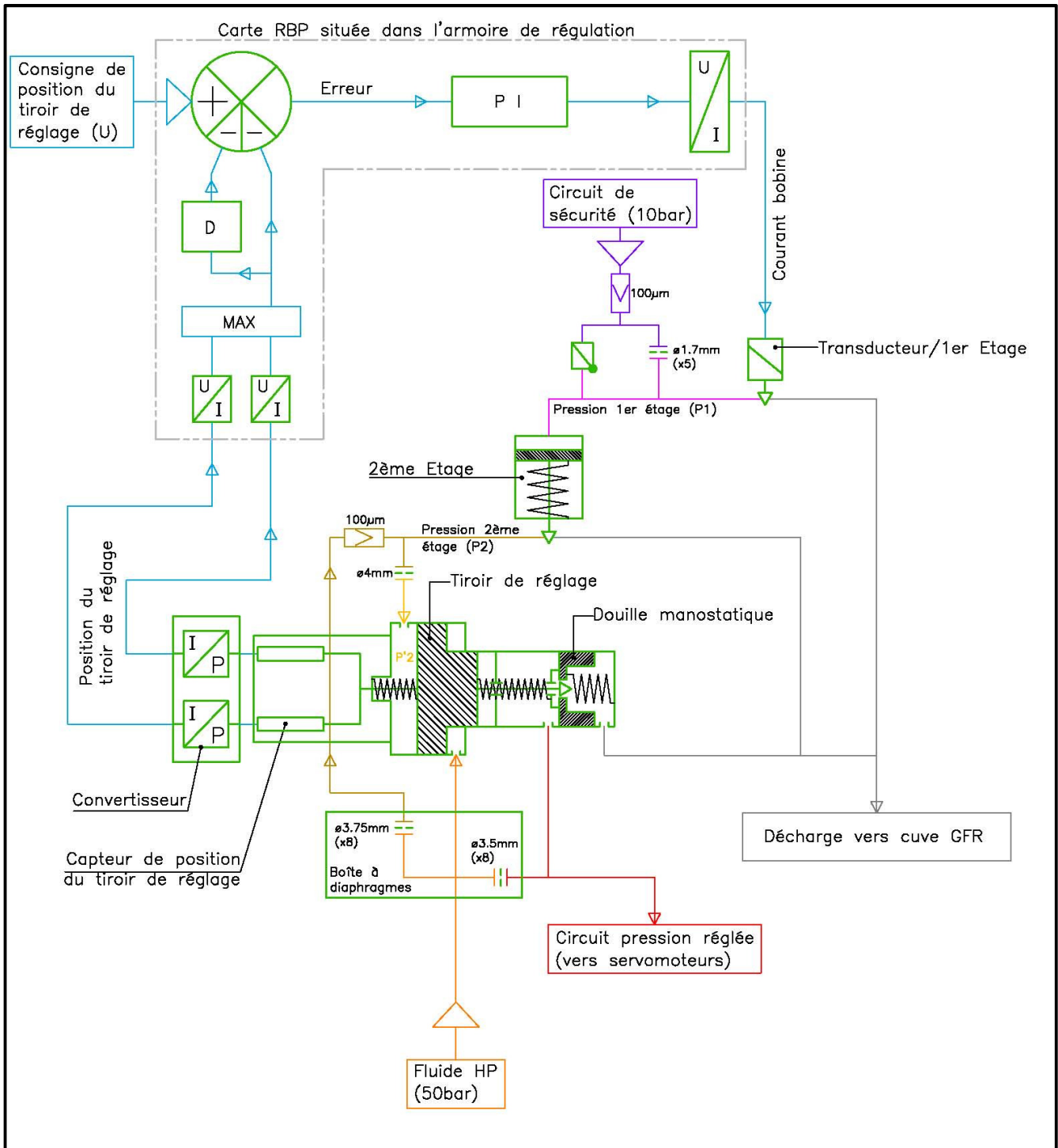
$a_d$  : Accélération la douille manostatique

$C_{vd}$  : Force d'amortissement hydraulique.

Un ressort situé entre la douille manostatique et le tiroir de réglage assure un écartement minimum entre ces 2 pièces en cas de casse du ressort du tiroir de réglage. Ce ressort n'est pas représenté sur la Figure 10 : Schéma fonctionnel de l'étage manostatique.

**c. La boucle de position du tiroir de réglage**

Le schéma fonctionnel ci-dessous permet de visualiser le CEH avec sa boucle de position comprenant les capteurs de déplacement, les convertisseurs et le régulateur de position.



**Figure 11 : Schéma fonctionnel de la boucle de position du tiroir de réglage du CEH**

➤ *La mesure de position du tiroir de réglage*

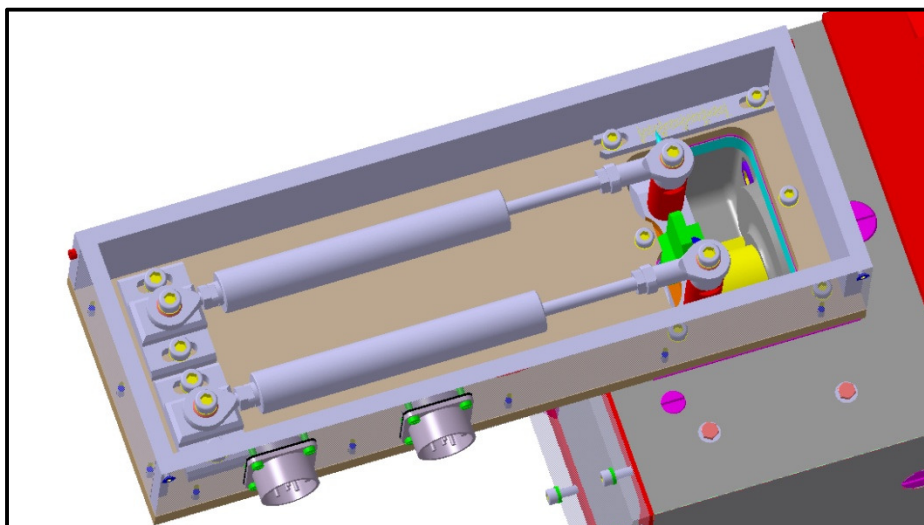
Une mesure de position du tiroir de réglage, effectuée par 2 capteurs de déplacement, est envoyée à un régulateur de position via des convertisseurs position/intensité électrique et intensité électrique/tension en série.

La présence de 2 capteurs de déplacement assure une redondance.

Un sélecteur à maximum choisi la plus grande des deux mesures de position de façon à privilégier la mise à la décharge du circuit à pression réglée par le CEH, et donc la fermeture des soupapes de réglage, en cas de dérive à la hausse d'une des 2 mesures.

Remarque : pour cause d'obsolescence, les capteurs de déplacement ont été remplacés à plusieurs reprises depuis l'origine. Les capteurs de première génération étaient des capteurs de proximité inductifs à courants de Foucault. Les capteurs de dernière génération sont de type L.V.D.T.<sup>x</sup>

Caractéristiques du capteur dernière génération	
Elément	Valeur
Course	0-50mm
Vitesse de déplacement	5m/s max
Résistance de la piste	5 à 10 k $\Omega$
Linéarité	indépendante jusqu'à +/- 0,05%
	<b>Type</b>
Fixation	2 rotules sphériques



**Figure 12 : Vue des capteurs dernière génération**

➤ *Le régulateur de position (Carte RBP<sup>xi</sup>)*

Le régulateur de position permet de régler la position du tiroir de réglage à la consigne de position demandée.

Il s'agit d'un régulateur de type PID<sup>xii</sup>.

La consigne de position provient de la régulation de puissance électrique du groupe turbo-alternateur (Voir Figure 4 : Schéma de base de la régulation de puissance et de vitesse du groupe turbo-alternateur).

La mesure de position provient des capteurs de position du tiroir de réglage.

La tension de sortie du PID est convertie en intensité électrique et envoyée dans le transducteur du CEH.

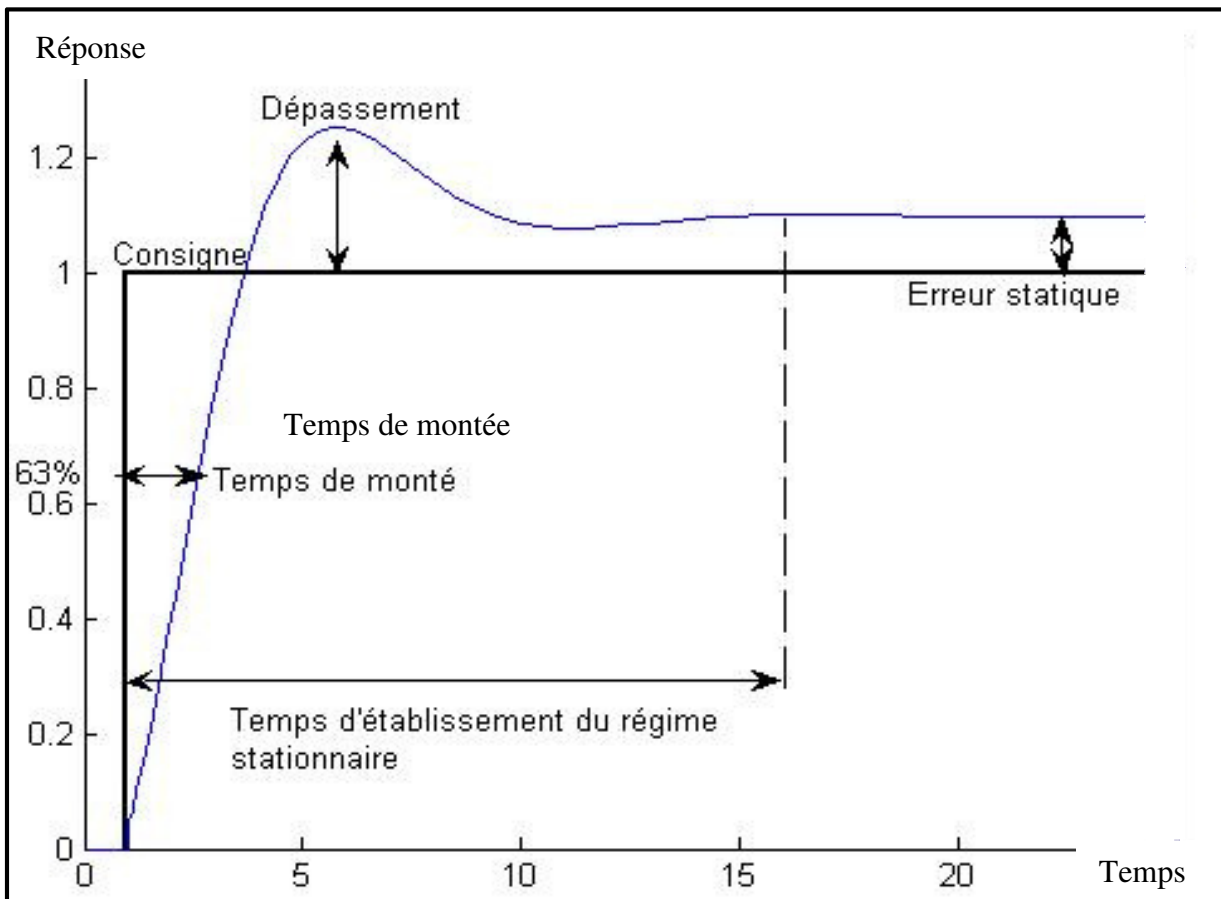


Figure 13 : Réponse type d'un PID stable

- L'action proportionnelle :

L'écart consigne-mesure est multiplié par un gain  $G_p$ .

L'action proportionnelle permet de réduire l'écart consigne-mesure.

Une augmentation du gain  $G$  réduit le temps de montée mais augmente le dépassement.

Remarque : Dans notre cas ce coefficient est réglable.

- L'action intégrale :

L'écart consigne-mesure est multiplié par un gain  $G_i$  puis intégré en fonction du temps.

L'action intégrale permet d'annuler l'écart consigne-mesure (erreur statique).

Une augmentation du gain  $G_i$  réduit le temps de montée mais augmente le dépassement et le temps d'établissement au régime stationnaire.

Remarque : Dans notre cas ce coefficient est réglable.

- L'action dérivée :

La dérivée n'est pas appliquée à l'écart consigne-mesure mais à la mesure seule afin d'éviter les à-coups dues à une variation subite de la consigne.

La mesure est multipliée par un gain  $G_d$ , filtrée (pour limiter l'influence du bruit de la mesure) et dérivée par rapport au temps.

La dérivée permet de corriger les effets du temps mort.

Une augmentation du gain  $G_d$  permet de réduire le temps de montée et le temps d'établissement au régime stationnaire.

Remarque : dans notre cas, le gain  $G_d$  et le filtre ne sont pas réglables.



### **III. Description de la problématique de pompage des CEH**

#### 1. Constat en exploitation

Sur site l'exploitant fait constat d'un problème d'oscillation de la puissance électrique produite par le groupe turbo-alternateur. Après investigation ce phénomène est provoqué par le pompage de la pression réglée générant une oscillation de l'ouverture des soupapes de réglage.

Ce problème se produit surtout à puissance électrique élevée.

Suite à ce dysfonctionnement récurrent, l'exploitant a déterminé une limite acceptable de l'amplitude d'oscillation de la puissance électrique. Cette limite est de 7MW crête à crête. Selon l'exploitant, cette limite correspondrait à une amplitude de pompage de la pression réglée de 200mbars.

#### 2. Constat lors des essais de maintenance sur site

Le pompage de la pression réglée est également visible, groupe turbo-alternateur à l'arrêt, lors des essais de maintenance.

Les essais de maintenance consistent à enregistrer, en boucle fermée, la pression réglée, la position des soupapes de réglage, suite à des petits échelons et des grands échelons de consigne.

Les figures 13 et 14 ci-dessous proviennent des essais de maintenance réalisées sur la tranche 4 de la centrale de CATTENOM en mars 2013.

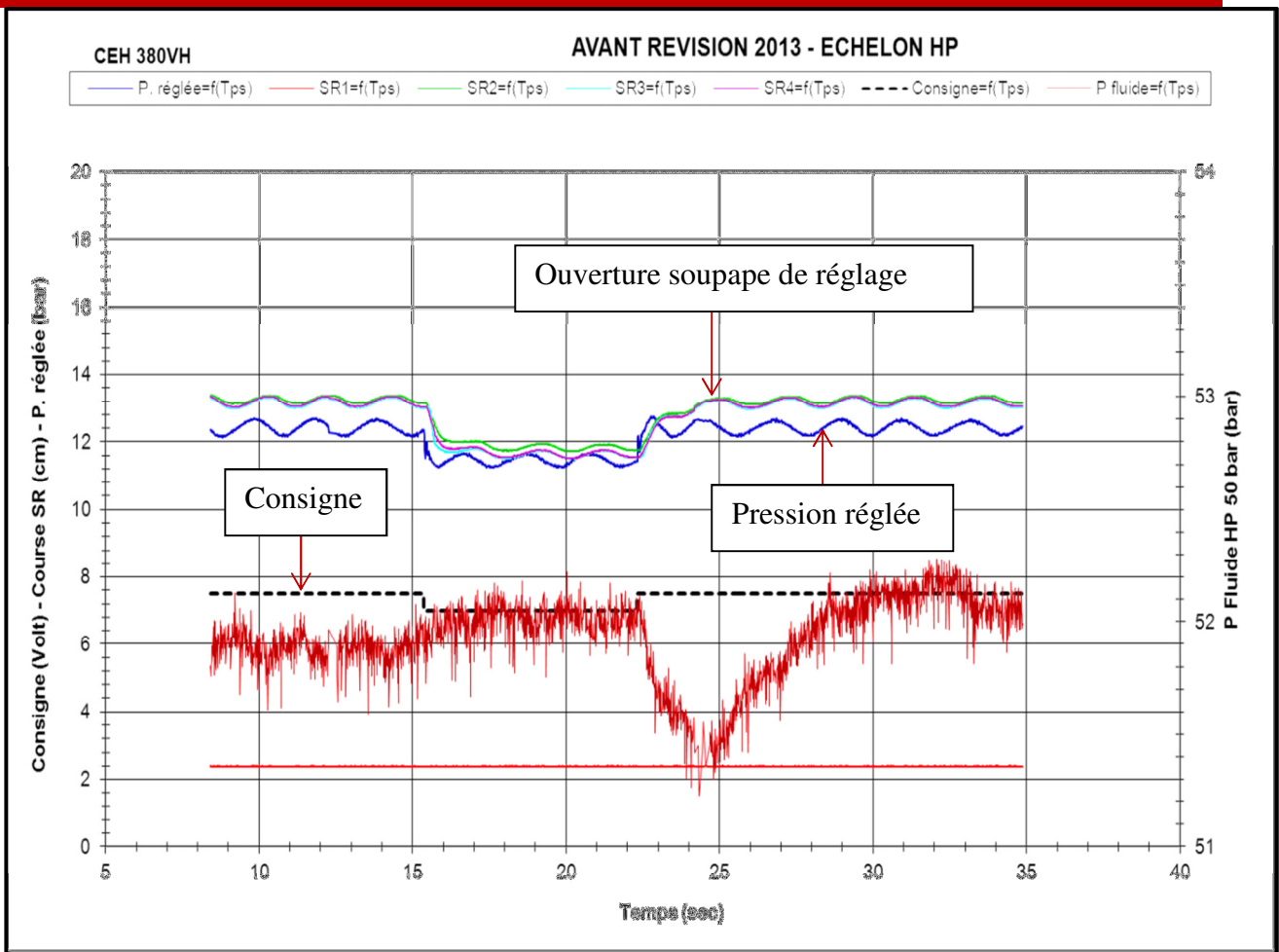


Figure 14 : Réponse de la pression réglée et des soupapes de réglage sur petits échelons de consigne

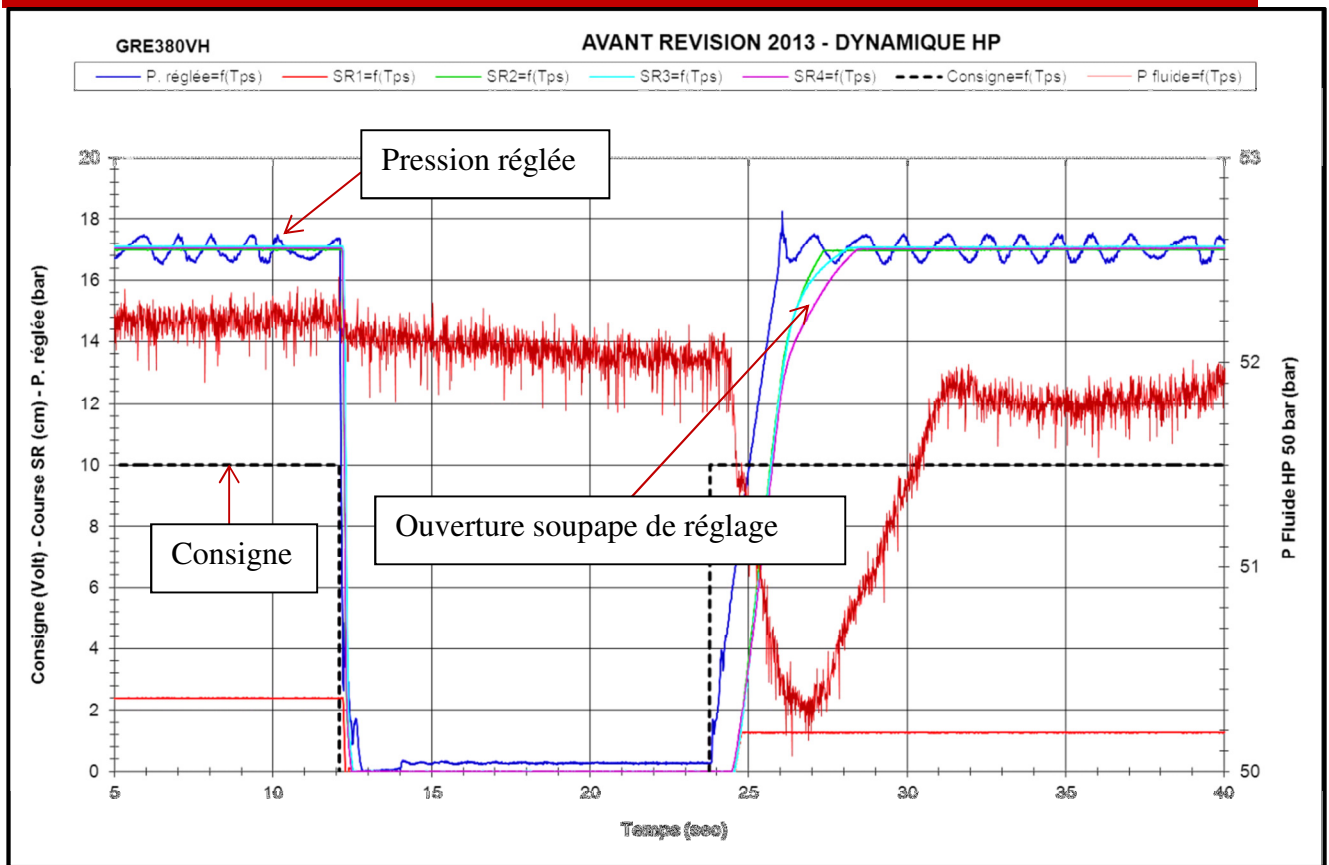


Figure 15 : Réponse de la pression réglée et des soupapes de réglage sur grands échelons de consigne

Les courbes ci-dessus permettent de visualiser le pompage de la pression réglée et de la position des soupapes de réglage. Sur ces courbes le pompage a une amplitude d'environ 1bar et une fréquence l'ordre de 1Hz.

D'autres essais montrent que le pompage est également présent lorsque la consigne évolue suivant une rampe lente.

Les pompages sont présents, à une fréquence proche mais à une amplitude différente, sur toutes les tranches P'4 équipée d'une régulation électronique de type MICROREC.

### 3. Constat lors des essais de maintenance en plateforme hydraulique

Les appareils hydrauliques des différentes turbines des centrales électriques sont périodiquement expertisés et testés sur notre plateforme hydraulique.

Actuellement, ces appareils doivent répondre à certains critères d'essais après chaque maintenance réalisée sur site. Voir Annexe 1 : Relevés réalisés dans le cadre d'une maintenance sur site.

Le pompage de la pression réglée n'est pas visible lors des essais de maintenance des CEH en plateforme hydraulique.

Les essais de maintenance consistent à enregistrer, en boucle ouverte, la pression réglée et d'autres paramètres internes à l'appareil, lorsque l'intensité électrique évolue suivant des rampes lentes.

Des essais supplémentaires ont montré l'absence de pompage suite à des petits échelons et des grands échelons de consigne.

## IV. Investigations

### 1. Essais entrepris sur le site de CATTENOM tranche 4

#### a. Objectif

Identifier les causes possibles du pompage du CEH visible sur les courbes d'essais Figure 14 et Figure 15, réalisées en mars 2013.

Des essais ont donc été réalisés, en juin 2013, en boucle ouverte et en boucle fermée afin d'étudier le comportement de l'appareil.

### **b. Liste des paramètres enregistrés**

- L'intensité électrique injectée dans le transducteur → « I (bobine) » ;
- La consigne → « Consigne » ;
- Position soupape de réglage SR1 → « Course SM » ;
- Pression réglée → « Pression réglée » ;
- Position du tiroir de réglage → « Course tiroir » ;
- Position de la tige du servomoteur → « Course SM » ;
- Pression du deuxième étage → « P<sub>2</sub> » ;
- Pression du premier étage → « P<sub>1</sub> » ;
- Pression de sécurité (10 bars) → « Pompe 1 » ;
- Pression d'alimentation HP (50 bars)
  - Prise en aval des filtres HP de GFR → « Pompe sur GFR » ;
  - Prise en local sur le CEH → « Pompe 2 ».

### **c. Essai 1 : Comportement en statique et en boucle ouverte du CEH**

#### ➤ **But**

Vérifier en statique et en boucle ouverte le fonctionnement de chacun des éléments principaux du CEH à savoir :

- Le transducteur ;
- Le 1<sup>er</sup> étage ;
- Le 2<sup>ème</sup> étage ;
- Le tiroir de réglage ;
- La douille manostatique.

#### ➤ **Conditions d'essai**

Boucle ouverte avec injection dans le transducteur d'une intensité électrique variable à l'aide d'un générateur de courant. Cette intensité évolue selon une rampe lente croissante puis décroissante.

➤ *Courbes réalisées*

Annexe 2 : Courbes réalisées en boucle ouverte

➤ *Analyse des courbes*

Les courbes sont conformes aux critères d'acceptation des spécifications ALSTOM sauf pour les points suivants :

- La courbe  $P_1 = f(P_2)$  présente une hystérésis anormale.
- La courbe Course tiroir =  $f(P_2)$  présente les anomalies suivantes :
  - La pression  $P_2$  de début du mouvement du tiroir de réglage est non conforme ( $\approx$  4bars inférieurs) ;
  - La courbe à la montée croise celle de la descente.
- La courbe  $Pr = f(\text{Course tiroir})$  présente une saturation en fin du mouvement.
- La courbe Course tiroir =  $f(I(\text{bobine}))$  présente les anomalies suivantes :
  - Le  $I(\text{bobine})$  du début du mouvement du tiroir de réglage est non conforme ( $\approx$  50mA inférieurs) ;
  - La courbe à la montée croise celle de la descente.

➤ *Interprétation des anomalies*

- L'hystérésis anormale de la courbe  $P_1 = f(P_2)$  est due à l'instabilité de la pression d'alimentation 50bars. Cette instabilité est due à un dysfonctionnement du régulateur de cette pression.
- La non-conformité de la pression  $P_2$  de début du mouvement du tiroir de réglage est due à un mauvais pré-bandage du ressort du tiroir de réglage.
- Le croisement de la courbe Course tiroir =  $f(P_2)$  ne correspond pas à un dysfonctionnement du CEH mais à l'instabilité de la pression d'alimentation 50bars due à un dysfonctionnement du régulateur de cette pression.
- La saturation constatée en fin de course du tiroir sur la courbe  $Pr = f(\text{Course tiroir})$  est due à une non-linéarité de la sortie auxiliaire en tension du convertisseur position/intensité électrique.
- La non-conformité du  $I(\text{bobine})$  de début du mouvement du tiroir de réglage est due à un mauvais pré-bandage du ressort du tiroir de réglage.

- Le croisement de la courbe Course tiroir = f (I (bobine)) ne correspond pas à un dysfonctionnement du CEH mais à l'instabilité de la pression d'alimentation 50bars due à un dysfonctionnement du régulateur de cette pression.

Remarque : Une instabilité de la pression d'alimentation 50bars créée par le régulateur de pression va influencer l'appareil suivant le processus mécanique ci-dessous :

- Stabilité de la pression d'alimentation 50bars
- Chute de la pression d'alimentation 50bars
- Déplacement du tiroir de réglage vers la douille manostatique
- Augmentation de la pression réglée car on diminue la décharge du CEH en diminuant la section de passage entre tiroir et douille.
  - Le pilote du servomoteur va diminuer sa décharge
  - Augmentation de la course du servomoteur
  - Mouvement d'ouverture de l'organe d'admission
- La régulation « RBP » détecte une erreur sur la position du tiroir de réglage
- La régulation « RBP » va donc corriger l'erreur en diminuant le « I (bobine) »
- Diminution de la pression  $P_2$  en sortie du 2<sup>ème</sup> étage
- Déplacement du tiroir de réglage dans le sens opposé à la douille manostatique
- Diminution de la pression réglée car on augmente la décharge du CEH en augmentant la section de passage entre tiroir et douille.
  - Le pilote du servomoteur va augmenter sa décharge
  - Diminution de la course du servomoteur
  - Mouvement de fermeture de l'organe d'admission (la soupape de réglage va retrouver sa position initiale qu'elle avait avant la chute de la pression d'alimentation 50bars)

➤ *Action corrective*

Le pré-bandage bandage du ressort du tiroir de réglage a été corrigé.

➤ *Conclusion*

Le comportement du CEH en statique est conforme à nos exigences.

**d. Essai 2 : Comportement en statique, dynamique et en boucle fermée du  
CEH**

➤ *But*

Analyser en statique, dynamique et en boucle fermée le comportement du CEH.

➤ *Conditions d'essais*

Boucle fermée avec injection dans la carte RBP « MICROREC » d'une tension électrique variable à l'aide d'un générateur de tension. Cette tension évolue en petits et grands échelons ou selon une rampe lente.

➤ *Courbes réalisées*

Voir Annexe 3 : Courbes réalisées en boucle fermée sur site

➤ *Analyse des courbes*

En statique la courbe Course SM et  $P_r = f$  (consigne) est conforme aux critères d'acceptation ALSTOM

En dynamique toutes les courbes présentent des anomalies. En effet, on constate une oscillation de tous les paramètres que l'on appellera pompage.

- Avec une consigne avec de petits échelons tous les paramètres enregistrés pompent.
- Avec une consigne selon une rampe lente descendante, on remarque une diminution des pompages. Sur la courbe « Course servomoteur » on peut visualiser une diminution du pompage à partir de 90mm de course.
- A consigne stable, on a environ 2mm d'oscillation au niveau de la course du servomoteur dû au pompage de la pression réglée. On retrouve également une valeur de pompage de 500mbars sur la pression réglée qui avait été mesuré lors des essais de maintenance.

Remarque 1 : Que le régulateur de la pression d'alimentation (50bars) fonctionne correctement ou pas, tous les paramètres enregistrés pompent.

Remarque 2 : Les oscillations du tiroir de réglage du CEH, donc de la pression réglée qui alimente les pilotes des servomoteurs des soupapes de réglage, sont présentes même si les soupapes sont ouvertes à 100% et qui donc n'appellent pas de débit.



➤ *Interprétation des anomalies*

A partir d'une certaine consigne le système bouclé rentre en oscillation ou se stabilise.

**e. Conclusion**

En boucle ouverte lorsque le transducteur du CEH est piloté par le régulateur ALSTOM, on ne constate aucun pompage particulier.

En boucle fermée lorsque le transducteur du CEH est piloté par la régulation MICROREC et bouclé sur la position du tiroir de réglage, on constate un lien entre la valeur de consigne et une instabilité du système. En effet, lorsque la consigne dépasse un certain seuil une instabilité apparaît, et disparaît lorsque la consigne descend sous ce seuil.

Le pompage de la pression réglée n'est pas dû à une instabilité de la pression d'alimentation (50bars) ou de la pression de sécurité (10bars) mais à l'instabilité du système bouclé : position du tiroir de réglage → courant bobine → pression 1<sup>er</sup> étage → pression du 2<sup>ème</sup> étage → position du tiroir de réglage.

Cette instabilité ne peut provenir que du couple régulateur électronique/étage manostatique, soit un mauvais réglage de la carte RBP de la régulation électronique et un dysfonctionnement mécanique de l'étage manostatique.

Afin de vérifier l'hypothèse concernant un mauvais réglage de la carte RBP une dernière campagne d'essais a été menée sur la centrale de PENLY tranche 2.

**2. Essais entrepris sur le site de PENLY tranche 2**

**a. Objectif**

Le but de ces essais est de mettre en évidence que les réglages des paramètres PID de la carte RBP influencent directement la stabilité de l'appareil.

Ces appareils seront tout de même testés en boucle ouverte afin de valider leur fonctionnement intrinsèque afin de s'affranchir d'un dysfonctionnement mécanique ou hydraulique.

### b. Condition initiale avant essais

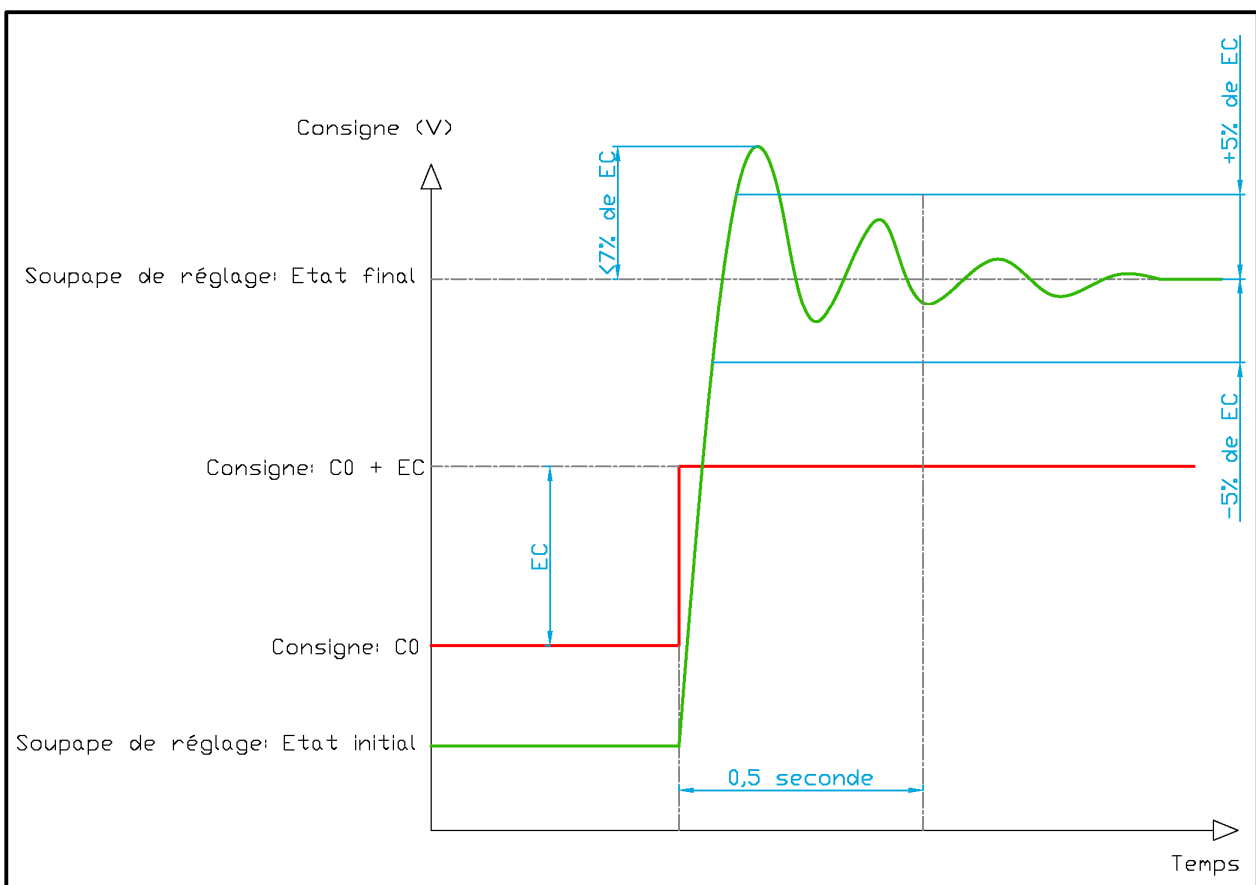
Le fluide de régulation est propre. Les filtres des CEH sont neufs.

Les mesures de position des deux CEH HP ont été réglées au préalable.

Le fluide de régulation ainsi que les 2 CEH HP sont conditionnés c'est-à-dire qu'ils sont à température de fonctionnement normal.

### c. Descriptif des essais

- Avec une pression réglée de 13,4bars (ou 8,5V de consigne), correspondant à la pleine charge pour un CEH HP, réaliser de petits créneaux continus de consigne ;
- Augmenter et diminuer P sans modifier I et D, visualiser le comportement du CEH ;
- Augmenter et diminuer I sans modifier P et D, visualiser le comportement du CEH ;
- Augmenter et diminuer P et I sans modifier D, visualiser le comportement du CEH ;
- Après avoir obtenu des valeurs de P et I optimisés, vérifier que la réponse du CEH est conforme aux critères de l'exploitant PIS<sup>xiii</sup>.



**Figure 16 : Critères PIS de la réponse en dynamique des soupapes de réglage sur échelon de consigne CEH**

#### **d. Constatation**

Ayant rencontré pas mal de problématiques dans la mise en œuvre des essais et dans l'acquisition des données, nous n'avons pas pu réaliser l'intégralité des essais planifiés. Malgré cela, nous avons fait les constatations suivantes :

##### **➤ *Augmentation de l'action proportionnelle (P)***

A consigne constante une augmentation du gain de 1,8 à 5 de cette action a supprimé complètement le pompage du CEH et de la pression réglée. Mais, un échelon de consigne a provoqué une forte instabilité du CEH et de la pression réglée.

La réduction du gain de cette action n'a pas eu d'influence notable sur le pompage du CEH et de la pression réglée.

Au vu des résultats le gain de cette action a été réglé à sa valeur d'origine 1,8 sur les 2 CEH.

##### **➤ *Diminution de l'action intégrale (I)***

L'augmentation du gain de cette action n'a pas eu d'influence notable sur le pompage du CEH et de la pression réglée.

La diminution du gain de cette action de 7,5 à 3 a eu pour conséquence une diminution significative de l'amplitude du pompage de la pression réglée sur l'un des deux CEH Cette diminution a entraîné un dépassement supérieur à la limite autorisée par les critères PIS (7%).

Au vu des résultats le gain de cette action a été réglé à une valeur de 5 sur les 2 CEH.

##### **➤ *Comportement des capteurs de position***

Nous avons remarqué également, mais visuellement, en regardant physiquement le pointeur de la réglette au niveau des capteurs de position, que l'amplitude de pompage de la position du tiroir de réglage des CEH HP était du même ordre de grandeur que celle des CEH BP.

Par contre, l'amplitude de pompage de la pression réglée était importante sur le CEH HP et nulle sur le CEH BP. Nous aurions donc aimé confirmer ce constat visuel en instrumentant la position du tiroir de réglage du CEH BP.

**e. Conclusion**

Nous n'avons pas trouvé de paramètres P et I permettant à la fois de supprimer le pompage et de satisfaire aux critères PIS.

**f. Remarque sur les critères PIS**

Ces investigations quelque peu décevantes, faute de temps, au point de vue résultats nous ont quand même permis d'identifier certaines incohérences documentaires. En effet, avant 2009 les critères PIS imposaient des limites sur les paramètres P et I. A partir de 2009 ces limites ont été supprimées des critères PIS. Pour autant, la procédure ALSTOM de réglage des boucles de position des CEH comportent toujours ces limites. Une demande de mise à jour de la procédure ALSTOM a été demandée au service concerné.

**3. Comparaison des différents types de CEH sur le palier P'4 (turbine 1300MW)**

**a. Introduction**

Sur le palier P'4, existent aussi des CEH BP et des CEH HP-BP (voir descriptions ci-dessous). Ces CEH ne semblent pas être sujet à des problématiques aussi importantes de pompage. Il nous a semblé pertinent de comparer le CEH HP avec le CEH BP et CEH HP-BP.

**b. CEH BP**

Les organes d'admission basse pression des turbines à vapeur du palier P'4 équipées d'une régulation MICROREC sont commandés par des CEH BP.

Les boucles de position du CEH HP et du CEH BP sont identiques et comportent les mêmes réglages des actions P, I et D.

Mécaniquement le CEH HP et le CEH BP ne se différencient que par :

- le diamètre du diaphragme de la pression d'alimentation 50bars (3,5mm sur CEH HP et 5mm sur CEH BP) ;
- l'angle de la lumière de réglage du tiroir (140° sur CEH HP et 90° sur CEH BP) ;
- le pré-bandage du ressort de la douille manostatique.

### **c. CEH HP-BP REC70**

Les organes d'admission haute et basse pression des turbines à vapeur du palier P'4 équipées d'une régulation REC70 sont commandés par des CEH HP-BP.

Le régulateur de position du CEH HP est différent de celui du CEH HP-BP.

Mécaniquement le CEH HP et le CEH HP-BP ne se différencient que par :

- le diamètre du diaphragme de la pression d'alimentation 50bars (3,5mm sur CEH HP et 6mm sur CEH BP) ;
- l'angle de la lumière de réglage du tiroir (140° sur CEH HP et 90° sur CEH BP) ;
- le pré-bandage du ressort de la douille manostatique.

### **d. Analyse**

Les 3 paramètres mécaniques listés ci-dessus permettent d'obtenir les caractéristiques souhaitées de la pression réglée.

La pression réglée n'ayant pas (ou très peu) d'influence sur la position du tiroir de réglage, ces 3 paramètres n'ont donc pas (ou très peu) d'influence sur la stabilité de la boucle de position du tiroir de réglage.

Toutefois ces 3 paramètres peuvent avoir une influence sur l'amplitude du pompage de la pression réglée.

## **V. Modélisation et simulation numérique**

### **1. Introduction**

#### **a. But**

Au vu des difficultés de mise en œuvre pour réaliser nos essais sur site, j'ai décidé d'entreprendre une modélisation numérique de l'appareil.

Cette modélisation/simulation numérique doit nous permettre de trouver l'origine des phénomènes de pompages afin de les limiter ou de les supprimer.

Pour ce faire, il a été décidé de modéliser le système complet de la carte électronique (RBP) jusqu'au pilote des servomoteurs en passant par la boîte à diaphragmes et bien évidemment le CEH complet.

### b. Périmètre de la modélisation

Le périmètre de la modélisation est entouré en orange dans le schéma ci-dessous :

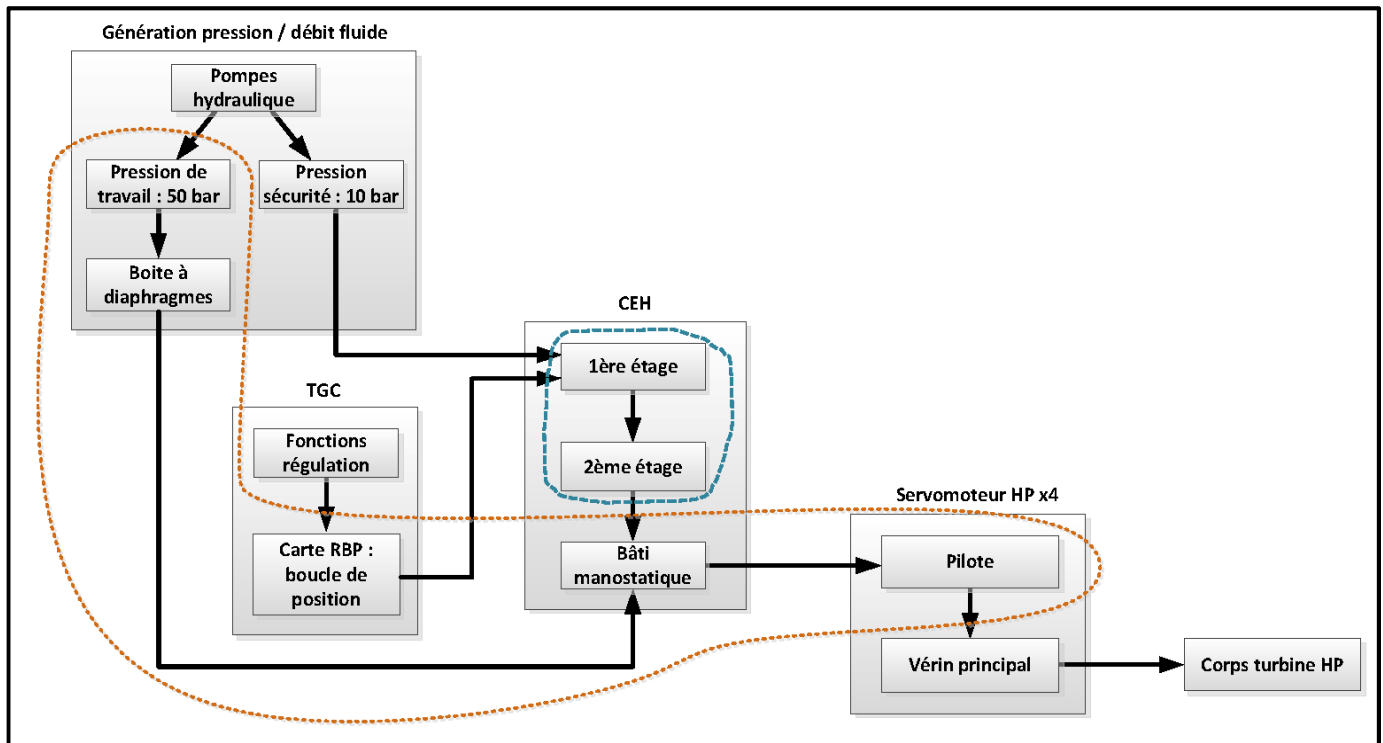


Figure 17 : Schéma du système

Afin de faciliter la modélisation déjà assez complexe et en prenant comme hypothèse que les pompages ne proviennent pas de cet ensemble, nous avons modélisé le transducteur/1<sup>er</sup> étage et le 2<sup>ème</sup> étage du CEH (zone entourée en bleu) par une fonction de transfert du 1<sup>er</sup> ordre en se basant sur des courbes expérimentales réalisées sur notre plateforme d'essais.

La fonction de transfert va définir  $P2 = f(I)$ , cela va nous permettre d'avoir directement la pression de déplacement du tiroir de réglage en fonction de la consigne.

Fonction du 1<sup>er</sup> ordre :  $F(p) = G/(1+\tau p)$  d'où  $P2 = 1/P \times G/(1+\tau p)$

La fonction de transfert recherchée n'est pas linéaire sur toute la course du tiroir de réglage. En effet, la chambre située en aval du tiroir doit se remplir en fluide en début de

mouvement du tiroir et se vider lors du retour du tiroir. Ce phénomène engendre une non-linéarité en début et en fin de mouvement.

Etant donné que le phénomène de pompage du CEH se produit pendant sa phase de régulation et non en début ou en fin de mouvement, nous pouvons donc ne prendre en compte que la plage du tiroir de réglage où celui-ci est en mouvement. Par conséquent, nous prendrons l'hypothèse que la fonction de transfert est linéaire.

Après analyse des tracés du CEH PT N°15775, les paramètres sont :

$$\tau = 0,2s$$

$$\text{Gain} = 0,05\text{bars/mA.}$$

**c. Processus de la modélisation**

Analyse des plans, spécifications et géométrie des pièces.



Modélisation de chaque sous-système :

- La carte de régulation (RBP) ;
- la partie transducteur/1<sup>er</sup> étage/2<sup>ème</sup> étage ;
- le tiroir de réglage ;
- la douille manostatique ;
- la boîte à diaphragmes ;
- les pilotes des servomoteurs.



Validation de chaque sous-système

en utilisant autant que possible les courbes issues de notre plateforme hydraulique ou de notre maintenance sur site.



Connexion des sous-systèmes afin d'avoir une modélisation global multi-physique et ainsi pouvoir simuler toute la boucle de régulation avec ses différentes interfaces.



Validation final en statique puis en dynamique du modèle en retrouvant les hystérésis, les points de fonctionnement et bien évidemment les pompages de l'appareil.



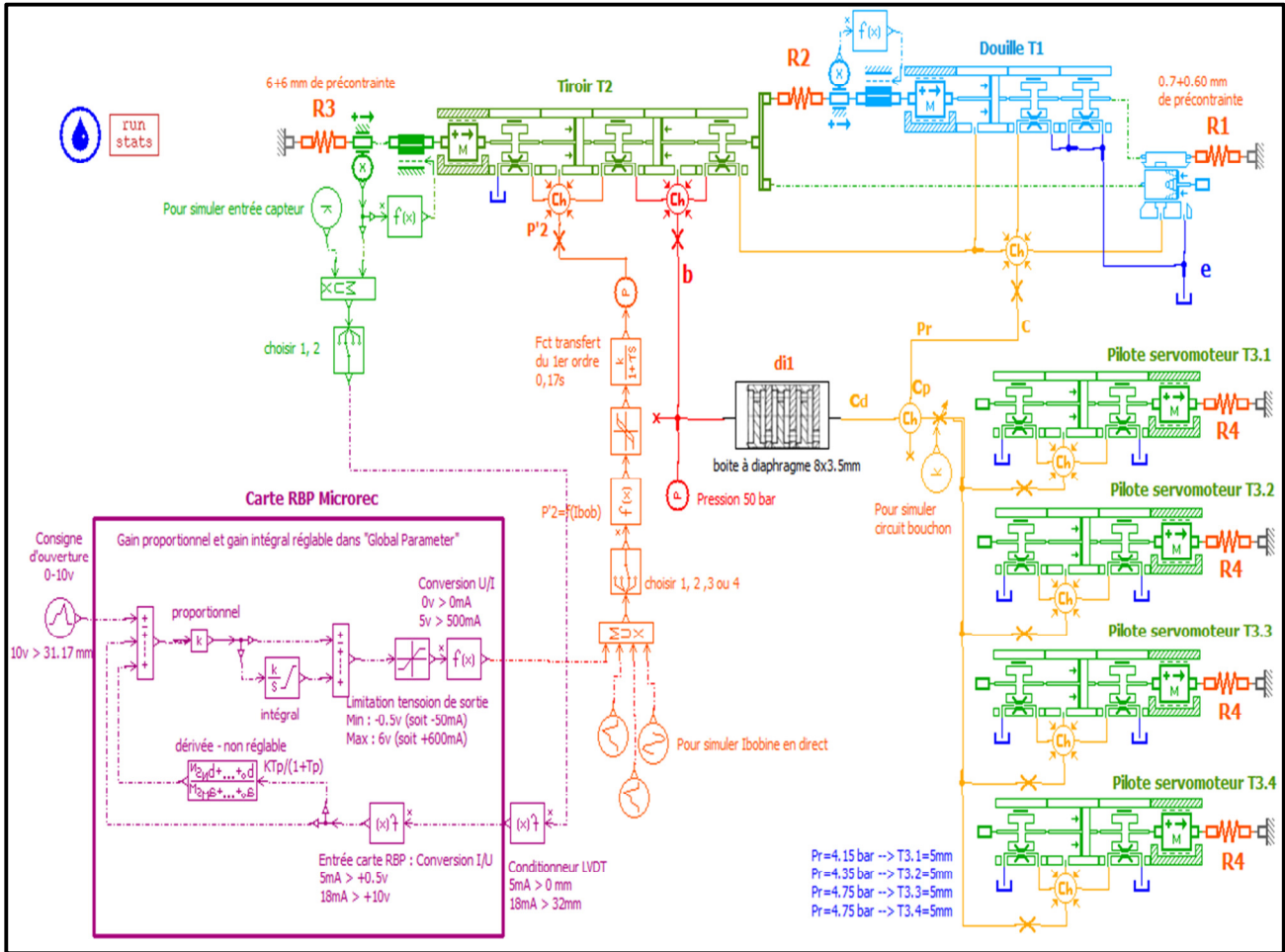
Essais de simulation en modifiant certains paramètres identifiés afin de trouver l'origine des pompages.

Remarque : Afin de mieux comprendre la modélisation et faire un lien avec les notations utilisées, un schéma a été créé en Annexe 4 : Notations utilisées pour la modélisation



2. Descriptif du système modélisé

Cette modélisation a été effectuée avec le logiciel LMS AMESIM R13.



**Figure 18 : Modélisation du système – Vue d'ensemble**

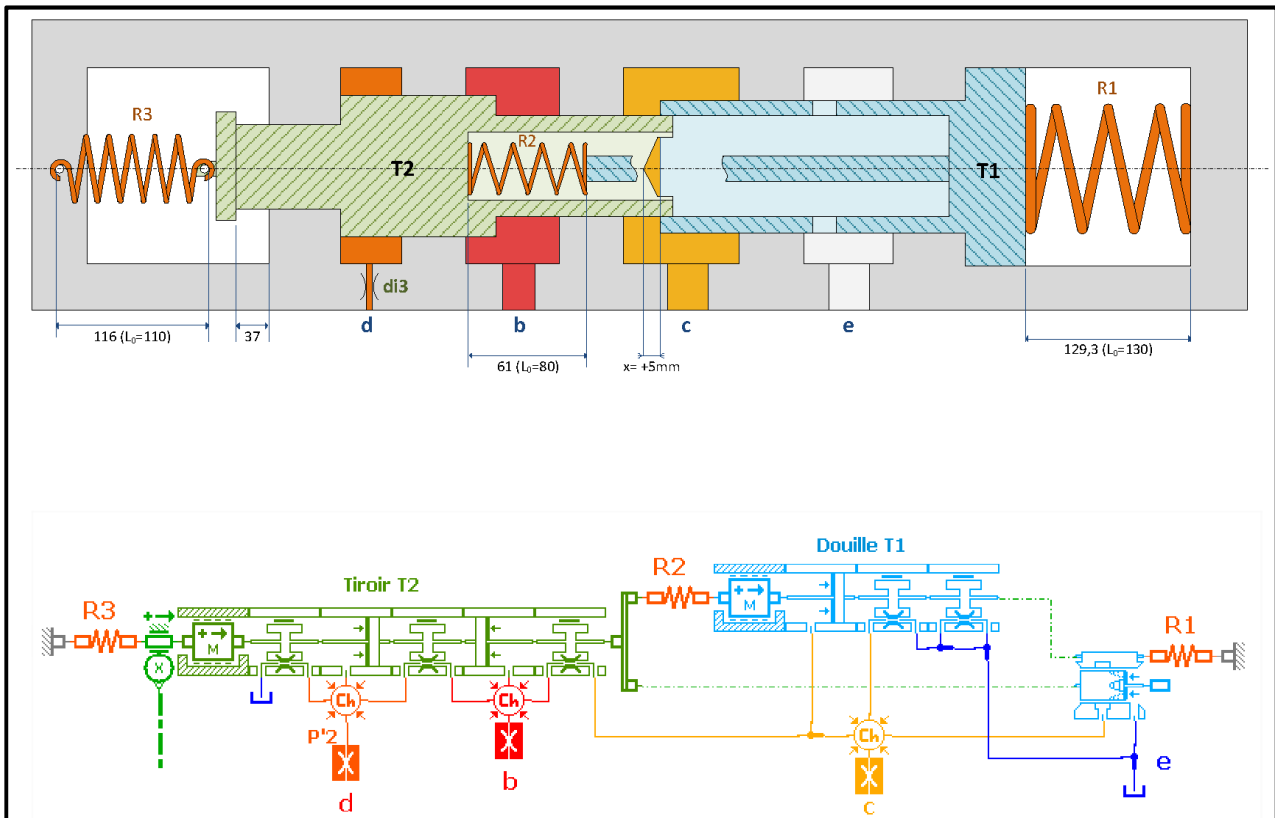
Annexe 5 : Blocs fonctionnels de la modélisation

**d. Modélisation de l'étage manostatique**

La donnée d'entrée est la pression  $P'_2$ . C'est la pression après le diaphragme di3, celle qui a été mesurée lors des essais en plateforme hydraulique.

➤ *Schéma ensemble*

Le schéma ci-dessous représente le bâti manostatique au repos, c'est-à-dire sans fluide. Cette position sera utilisée comme référence pour la modélisation.



**Figure 19 : Schéma simplifié et modèle du bâti manostatique**

➤ *Définition du tiroir de réglage T2*

Masse T2 : 1,760kg (déplacement positif vers la gauche) - Butée inférieure : 0mm - Butée supérieure : +37mm

Surface chambre (d), action fluide vers la gauche :  $\varnothing$  ext. = 46 mm –  $\varnothing$  int. = 34,4mm - Volume chambre pour un déplacement nul :  $\pi/4*(65^2-46^2)*24$  - Diamètre de passage à l'entrée : 16mm

Surface chambre (b) :  $\varnothing$  ext. = 46 mm –  $\varnothing$  int. = 34,4mm - Volume chambre pour un déplacement nul :  $\pi/4*(65^2-42^2)*36$  - Diamètre de passage à l'entrée : 16mm

➤ *Définition de la douille manostatique T1*

Masse T1 : 2,115kg (déplacement positif vers la gauche) - Butée inférieure : 0mm - Butée supérieure : +36mm

Surface chambre (c), action fluide vers la gauche :  $\varnothing$  ext. = 56mm –  $\varnothing$  int. = 42mm - Volume de la chambre pour un déplacement nul :  $\pi/4*(75^2-42^2)*32+\pi/4*(75^2-56^2)*28$  - Diamètre de passage à l'entrée : 20mm

➤ *Définition de la section de passage*

Interface Tiroir de réglage T2 / Douille manostatique T1 :  $\varnothing$  ext. = 42mm –  $\varnothing$  int. = 0mm - Recouvrement (Under lap) pour un déplacement nul des 2 pièces : 5mm - Nombre de région : 2 - Nombre d'encoche : 2 - Région 1 : Triangulaire, angle 140°, largeur 24mm - Région 2 : Rectangulaire : 24 x (12-4,367) mm

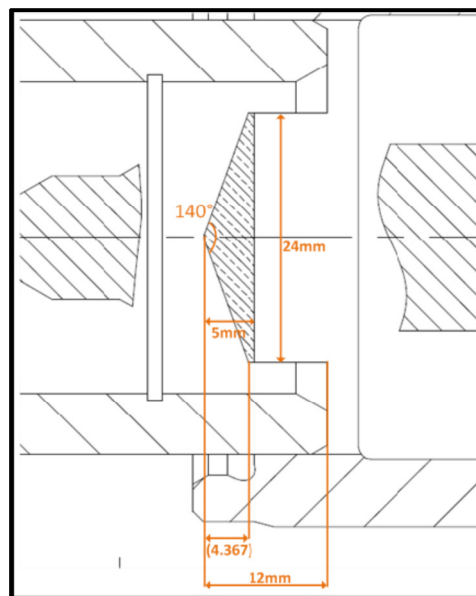


Figure 20 : Schéma 2D de l'interface tiroir/douille

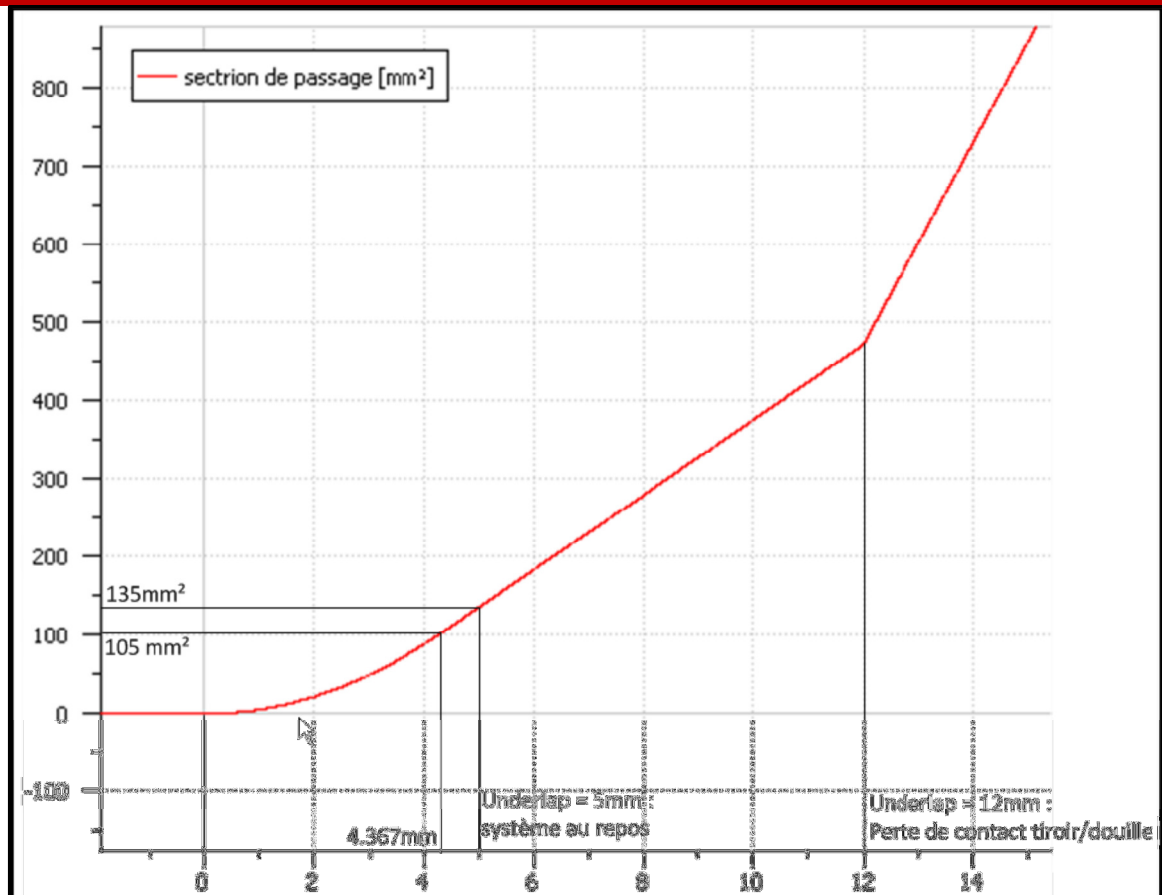


Figure 21 : Section de passage du fluide en fonction du recouvrement (Under lap)

➤ *Définition des ressorts*

R1 → Raideur =  $195 / (130-100) = 6,5\text{daN}$  - Précontrainte =  $0,7 + 1,3\text{mm}$

R2 → Raideur =  $14,01 / 45,4 = 0,3086\text{daN}$  - Précontrainte =  $80 - 61\text{mm}$

R3 → Raideur =  $1,3\text{daN}$  - Précontrainte =  $6 + 6\text{mm}$

Les valeurs en oranges ont été ajoutées sur les ressorts R1 et R3 pour recalibrer le modèle par rapport aux courbes obtenues en plateforme d'essais. Il est à noter que ces 2 ressorts possèdent une vis de réglage.

Remarque : Les courbes sont données au §V.3

➤ *Définition des fuites*

Les jeux fonctionnels entre pièces mobiles sont fixés à 40µm.

Les longueurs de contact sont celles données dans les plans mécaniques. De gauche à droite, les longueurs de contacts paramétrés dans les blocs sont : 20mm, 30mm, 23mm, 18mm, 35mm.

**e. Modélisation des pilotes de servomoteur**

➤ *Schéma ensemble*

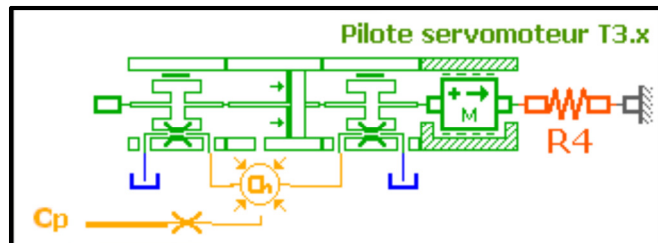


Figure 22 : Modèle d'un pilote de servomoteur

➤ *Définition des éléments*

Masse T3.x = 6kg (x = 1, 2, 3 ou 4) - Butée inférieure : 0mm - Butée supérieure : +40+5+4 mm

Surface chambre (cp), action fluide vers la gauche :  $\varnothing$  ext. = 110mm –  $\varnothing$  int. = 92mm - Volume de la chambre pour un déplacement nul :  $\pi/4*(110^2-92^2)*40$  - Diamètre de passage à l'entrée : 12mm

Ressort R4<sub>x</sub> : Raideur R4<sub>x</sub> = 7,5daN :

Précontrainte R4<sub>1</sub> = **10,80mm**

Précontrainte R4<sub>2</sub> = **11,57mm**

Précontrainte R4<sub>3</sub> = **13,10mm**

Précontrainte R4<sub>4</sub> = **13,10mm**

Remarque : La précontrainte des ressorts est ajustée de façon à respecter le protocole d'ouverture des soupapes de réglage haute pression, à savoir que le début d'ouverture de la soupape N°1 est obtenu pour Pr = 4,15bars, de la soupape N°2 est obtenu pour Pr = 4,35bars et les soupapes N°3 et N°4 sont obtenus pour Pr = 4,75bars.

Le début d'ouverture de la soupape correspond à une course du pilote de 5mm (rattrapage de la course morte).

➤ *Définition des frottements et des fuites*

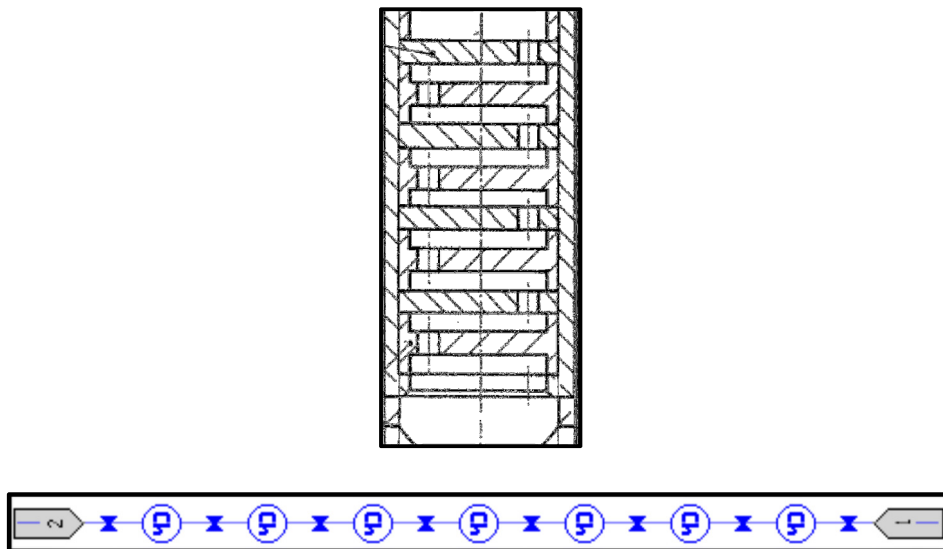
Frottement et fuites :

Les jeux fonctionnels entre pièces mobiles sont fixés à 40µm.

Les longueurs de contact sont celles données dans les plans mécaniques.

**f. Modélisation de la boîte à diaphragmes**

➤ *Schéma*



**Figure 23 : Vue 2D et modèle de la boîte à diaphragme**

Seule la série de diaphragme entre l'arrivé 50bars et les pilotes des servomoteurs est modélisé.

L'autre série de diaphragme est située entre l'arrivé de la pression 50bars et le 2<sup>ème</sup> étage du CEH. Etant donné que cette pression est imposée (issus de courbes d'essais réalisées sur notre plateforme hydraulique), la série de diaphragme n'a pas lieu d'être modélisée.

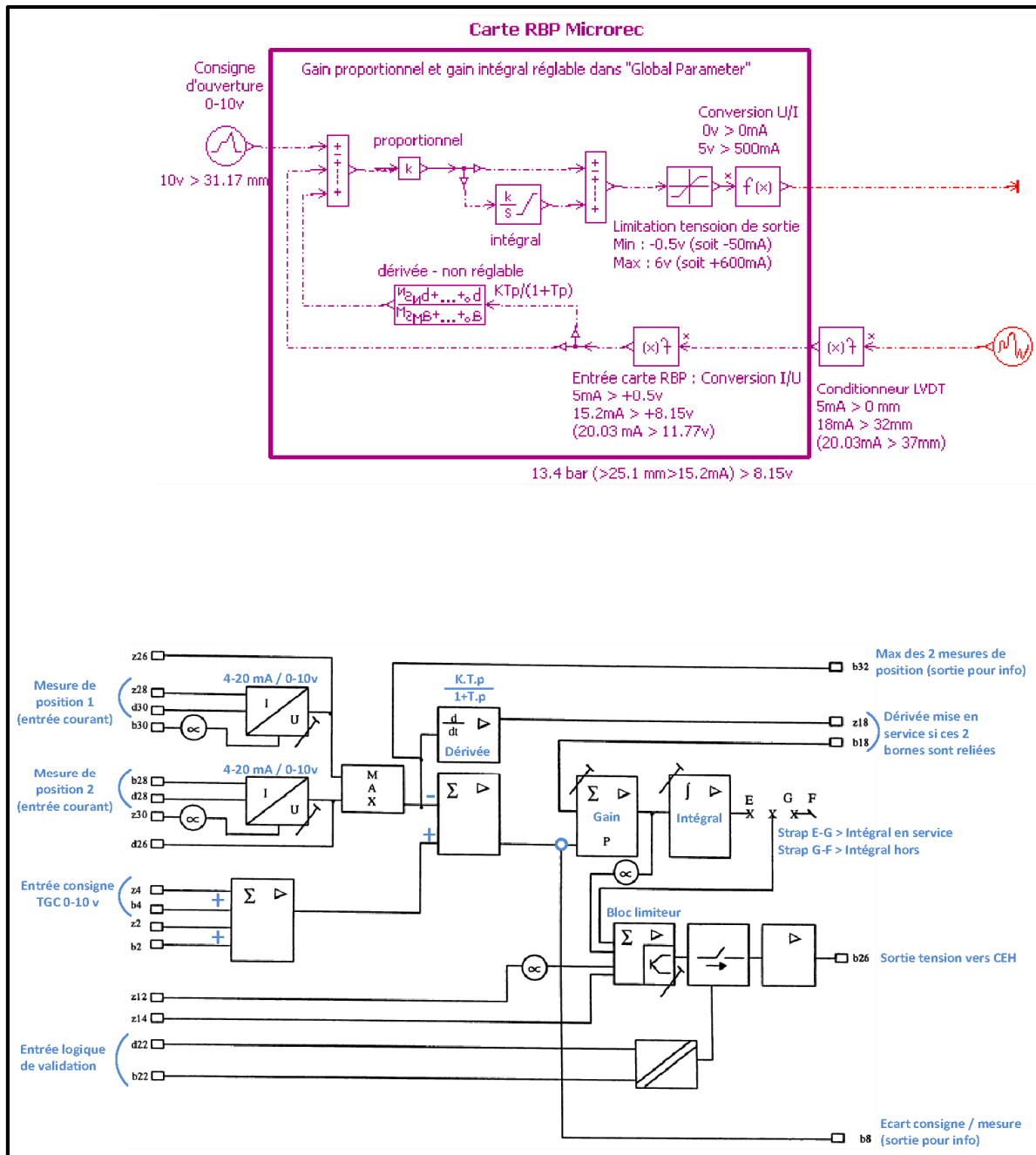
➤ **Définition des éléments**

Diamètre des diaphragmes : 3,5mm. Maximum flow coefficient : 0,9 (correspond à la « complexité » du passage hydraulique dans le diaphragme).

Volume entre chaque diaphragme :  $\pi/4 \cdot 30^2 \cdot 3,5$

**g. Modélisation de la carte RBP et du conditionneur LVDT**

➤ **Schéma**



**Figure 24 : Schéma logique et modèle de la carte RBP et du convertisseur position/intensité**

➤ *Définition du gain « P »*

Potentiomètre en face avant, la valeur du potentiomètre est appelée « Affichage P »

Pour information les metteurs en service de la régulation électronique font varier ce paramètre entre [1,5 ; 1,8]

Le gain proportionnel vaut :

$$P = [« \text{Affichage\_P} » - 0,1] \cdot (5 - 0,1) / (10 + 0,1)$$

Donc  $0,77 < P < 0,93$

➤ *Définition de la dérivée « D »*

La dérivée n'est pas réglable. Elle est mise en service ou non si les bornes sont reliées.

La fonction de transfert est :

$$K = (k \cdot \tau_p) / (1 + \tau_p)$$

Avec  $k = R84/100 = 82/100 = 0,82\Omega$

Et  $\tau_p = 100 \cdot R68 / (100 + R68) \cdot C26 \cdot 10^{-3} = 100 \cdot 5,6 / (100 + 5,6) \cdot C26 \cdot 10^{-3} = 5\text{ms}$

➤ *Définition de l'intégrale « I »*

Potentiomètre en face avant, la valeur du potentiomètre est appelée « Affichage\_I »

Pour information les metteurs en service de la régulation électronique font varier ce paramètre entre [5 ; 10]

Le gain intégral vaut :

$$T_i = (\text{Affichage\_I}) / 1,5$$

Donc  $0,15 < T_i < 0,3$  en  $s^{-1}$

L'intégrateur est borné entre -12V et +12V.



➤ *Définition du bloc limiteur*

La limitation inférieure est de -0,5V (soit une image courant bobine de -50 mA)

La limitation supérieure est de +6V (soit une image courant bobine de +600 mA)

➤ *Définition du convertisseur position/intensité*

Il transforme la position du tiroir T2 [0 ; 37mm] en un signal 4-20mA.

5mA  $\Leftrightarrow$  0 mm de déplacement

18mA  $\Leftrightarrow$  32 mm de déplacement

C'est une fonction affine de type  $y = a.x + b$ , avec a et b tel que :

$$\left[ \begin{array}{l} 5\text{mA} = a.0\text{mm} + b \\ 18\text{mA} = a.32\text{mm} + b \end{array} \right.$$

$$\left[ \begin{array}{l} a = (18-5)/32 = 13/32 \approx 0,4 \\ b = 5 \end{array} \right.$$

➤ *Définition du convertisseur intensité/tension en entrée de la carte RBP*

Le signal 4-20 mA en sortie du 1<sup>er</sup> convertisseur est convertie en un signal 0-10V.

5mA en sortie du conditionneur correspond à 0,5V en entrée de la carte RBP, de même 13,4bars de pression réglée correspond à 8,15V en entrée de la carte RBP.

Nous obtenons donc une pression réglée de 13,4bars pour une course du tiroir de réglage (T2) de 25.3mm et une intensité électrique du conditionneur de 15,2mA.

C'est une fonction affine de type  $y = a.x + b$ , avec a et b tel que :

$$\left[ \begin{array}{l} 0,5\text{V} = a.5\text{mA} + b \\ 8,15\text{V} = a.15,2\text{mA} + b \end{array} \right.$$

$$\left[ \begin{array}{l} a = 3/4 \\ b = -13/4 \end{array} \right.$$

➤ *Définition de l'amplification du signal en sortie de la carte RBP*

La sortie de la carte RBP évolue entre [-0,5V ; +6V]. La carte d'amplification traduit linéairement ce signal en [-50mA ; + 600mA]. Ce signal de commande est envoyé à la bobine du transducteur du CEH.

**h. Modélisation de l'ensemble transducteur, 1<sup>er</sup> étage et 2<sup>ème</sup> étage du CEH**

Afin de pouvoir corréler la modélisation avec la réalité ; des essais en PFH<sup>xiv</sup> ont été entrepris.

Mise en œuvre des essais : Mise en place d'un capteur de pression au niveau de P'<sub>2</sub> (c'est-à-dire en aval de di3). Le but est de mesurer cette pression pour différentes intensité électriques.

Les réponses indicielles avec des échelons sur l'intensité électrique appelée « I (bobine) » effectuées en PFH montrent que la relation entre l'intensité électrique et la pression P'<sub>2</sub> peut être modélisée par une fonction de transfert du 1<sup>er</sup> ordre.

Cet ensemble sera donc modélisé par une fonction de transfert qui donne :  $P'_2 = f(I(\text{bobine}))$

➤ *Schéma*

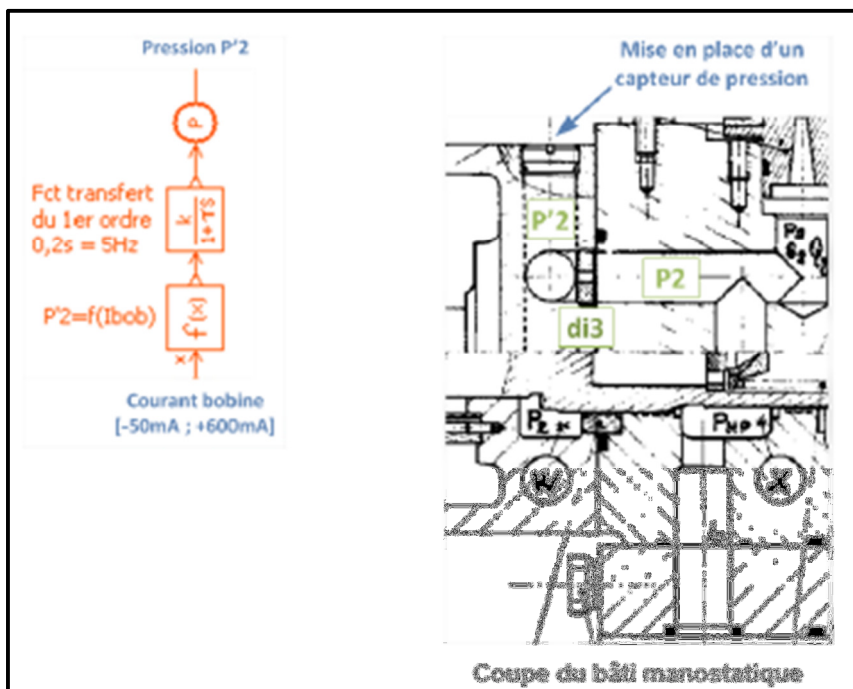


Figure 25 : Vue 2D sortie 2<sup>ème</sup> étage et modèle du transducteur/1<sup>er</sup> étage et 2<sup>ème</sup> étage

Comme on peut le visualiser sur la courbe théorique en Annexe 6 : Réponse indicielle théorique d'une fonction transfert du 1er ordre, la constante de temps ( $\tau$ ) est obtenue quand la sortie (ici la pression  $P'_2$ ) a atteint 63% de sa valeur finale.

Cela nous donne  $f = k/(1 + \tau)$

Avec  $k = 1$  (le gain est déjà pris en compte dans la fonction ci-dessus) et  $\tau = 0,2s$

La valeur de la constante de temps ( $\tau$ ) définie ci-dessus n'est valable que lorsque le tiroir de réglage (T2) n'est pas en butée mécanique.

Le tiroir est en butée mécanique en dessous de 265mA coté capteur de position et au-dessus de 408mA coté douille manostatique. Le tiroir est en mouvement lorsque le courant « I (bobine) » est compris dans [265 ; 408] mA

### 3. Validation statique du modèle

Nous sommes en condition d'essais en plateforme hydraulique :

- Le fluide défini est de l'huile VG46.
- La boucle de régulation est ouverte (Circuit bouchon en sortie de CEH et sans carte RBP)

a. Calage transducteur/1<sup>er</sup> étage/2<sup>ème</sup> étage

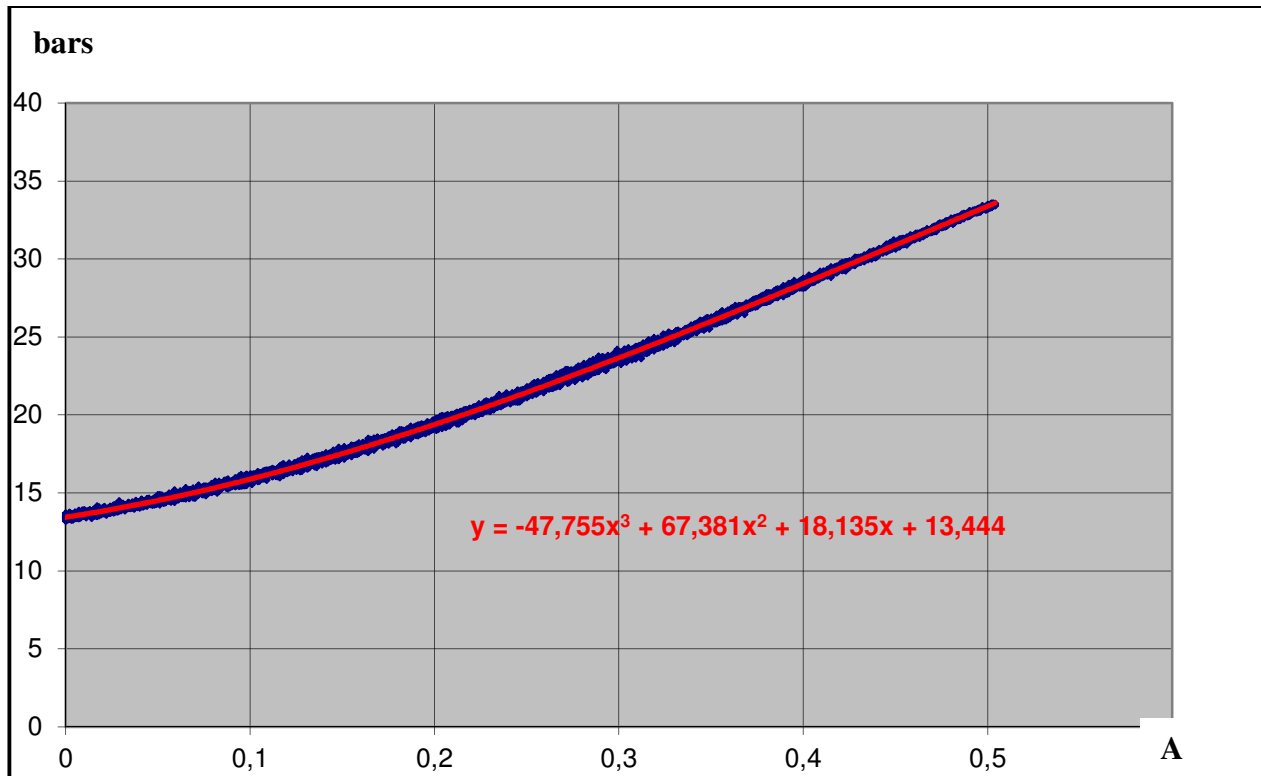


Figure 26 : P'2 = f (I (bobine)) - Courbe issue de la PFH

La courbe expérimentale en bleue est modélisée à l'aide d'une courbe de tendance en rouge par un polynôme du 3<sup>ème</sup> ordre dont l'équation est :  $y = -47,55x^3 + 67,38x^2 + 18,135x + 13,45$ .

Après avoir tracé la courbe sur AMESIM, la valeur d'intensité en début de mouvement du tiroir est trop faible par rapport à la courbe expérimentale réalisée en PFH, de l'ordre de 253mA pour 263mA.

Afin de se caler à la valeur expérimentale qui correspond au début du mouvement du tiroir de réglage, on ajuste le dernier terme du polynôme. L'équation devient  $y = -47,55x^3 + 67,381x^2 + 18,135x + 13$ . Il faut ensuite intégrer l'hystérésis  $\approx 10$ mA directement dans le modèle via un nouveau bloc de définition.

La modélisation de l'ensemble transducteur/1<sup>er</sup> étage/2<sup>ème</sup> étage est ainsi finalisée et paramétrée suivant les données expérimentales réalisées en atelier.

b. Calage du tiroir de réglage (T2) via le ressort (R3) et les forces de frottement

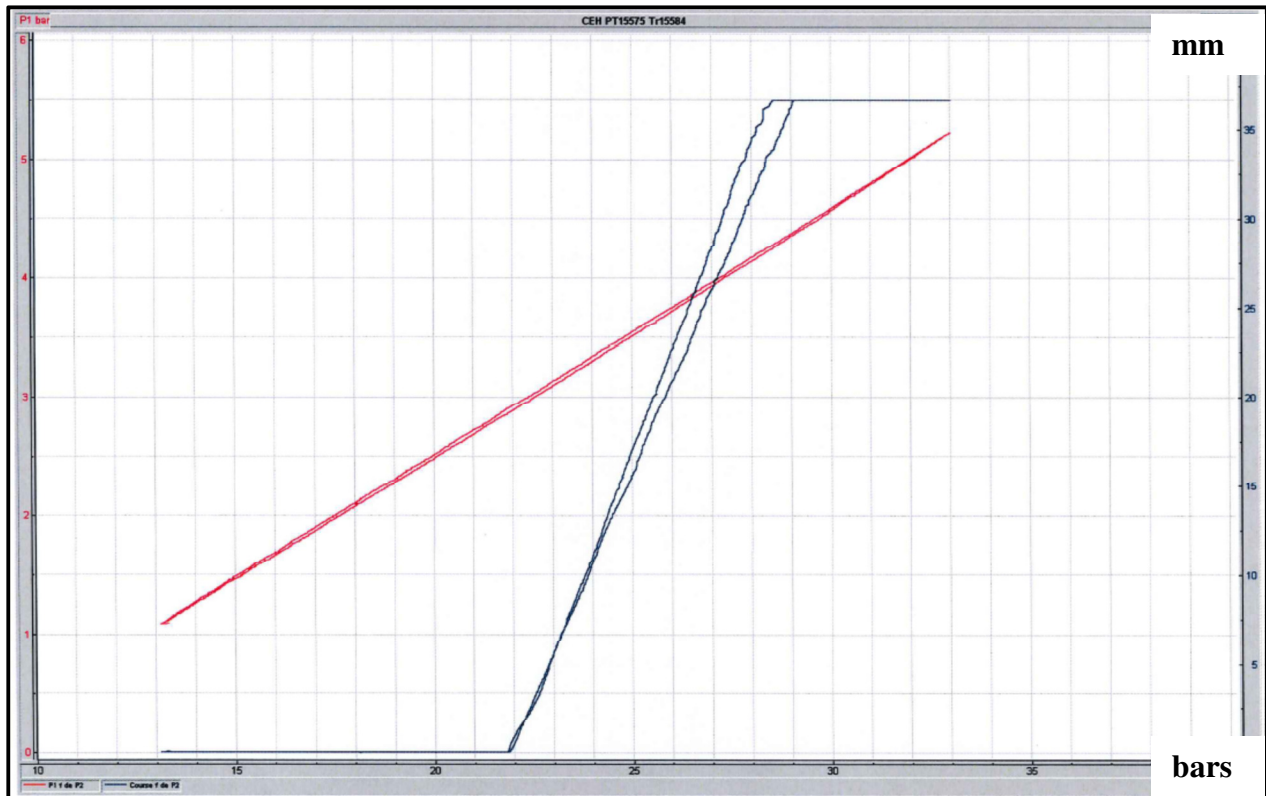
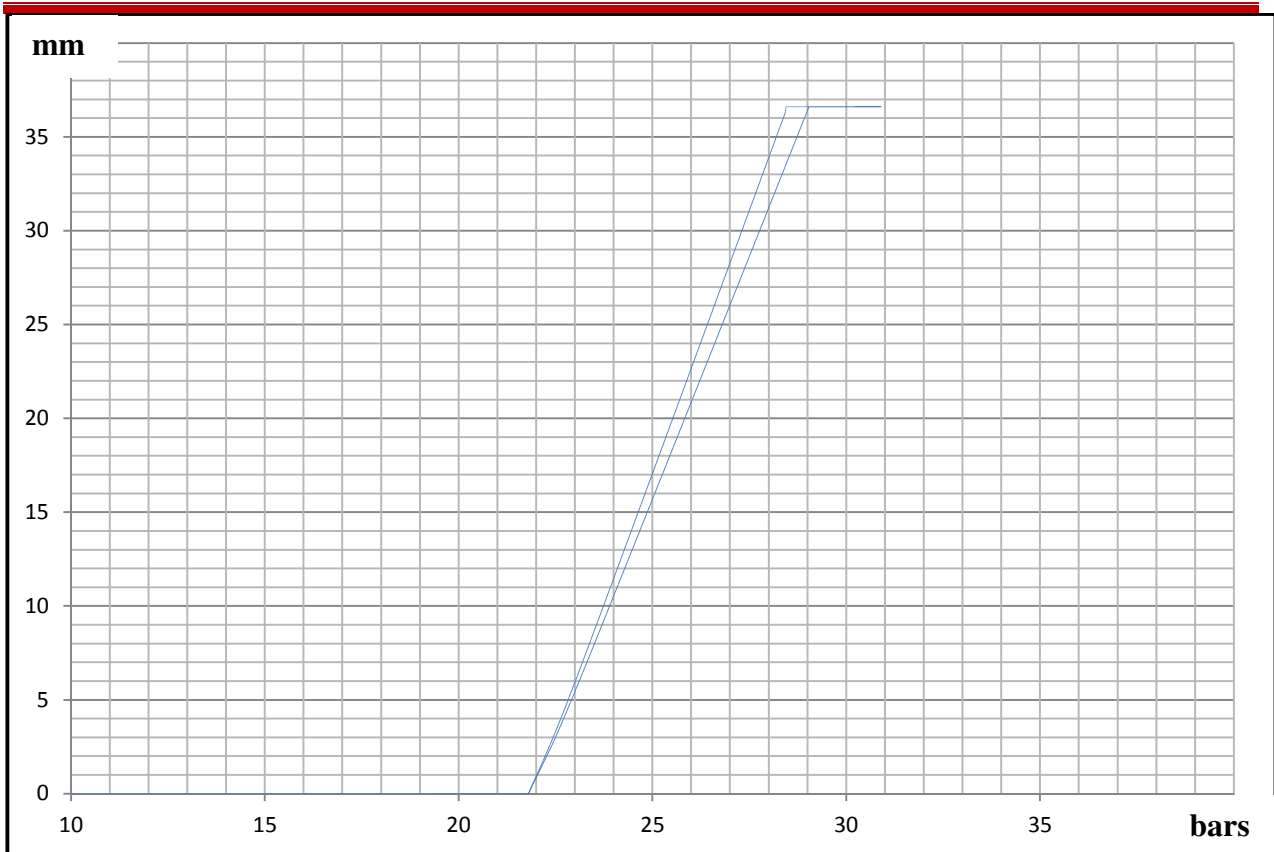


Figure 27 : Position tiroir = f (P'2) - Courbe issue de la PFH

Nous nous intéressons à la courbe en bleue dont les valeurs caractéristiques sont :

- Le début de la course du tiroir de réglage est donnée pour  $P'_2 = 21,8\text{bars}$ .
- La fin de la course du tiroir de réglage est donnée pour  $P'_2 = 28,75\text{bars}$ .
- Une hystérésis sur  $P'_2 \approx 600\text{mbars}$ .



**Figure 28 : Position tiroir = f (P'2) - Courbe obtenue sur AMESIM**

Les valeurs de calibrage sont :

- Une précontrainte du ressort, fixée à 12mm au lieu de 6mm.
- Une raideur du ressort, fixée à 1,352 mm au lieu de 1,3mm.
- Une force de frottement cinétique (Coulomb friction force) de 20N, afin de retrouver l'hystérésis.

c. Calage de la douille manostatique (T1) via le ressort (R1) et les forces de frottement

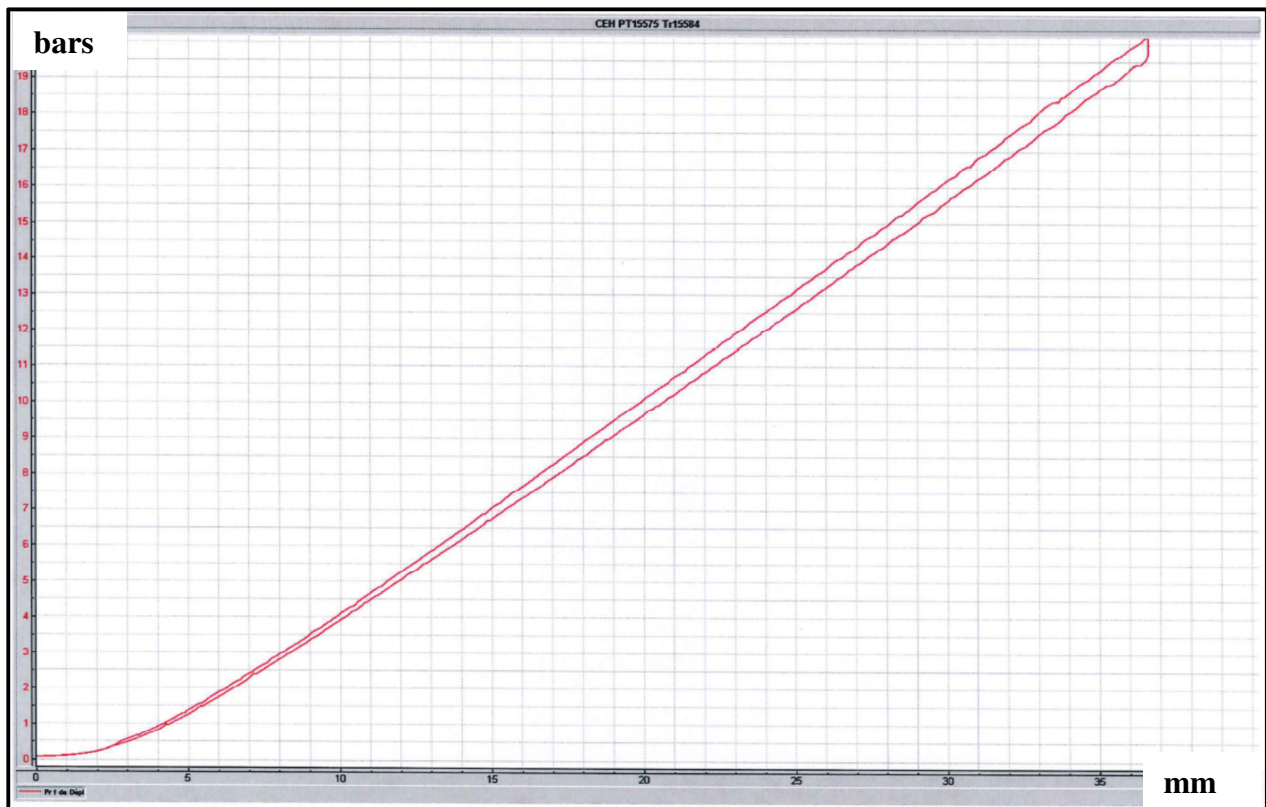
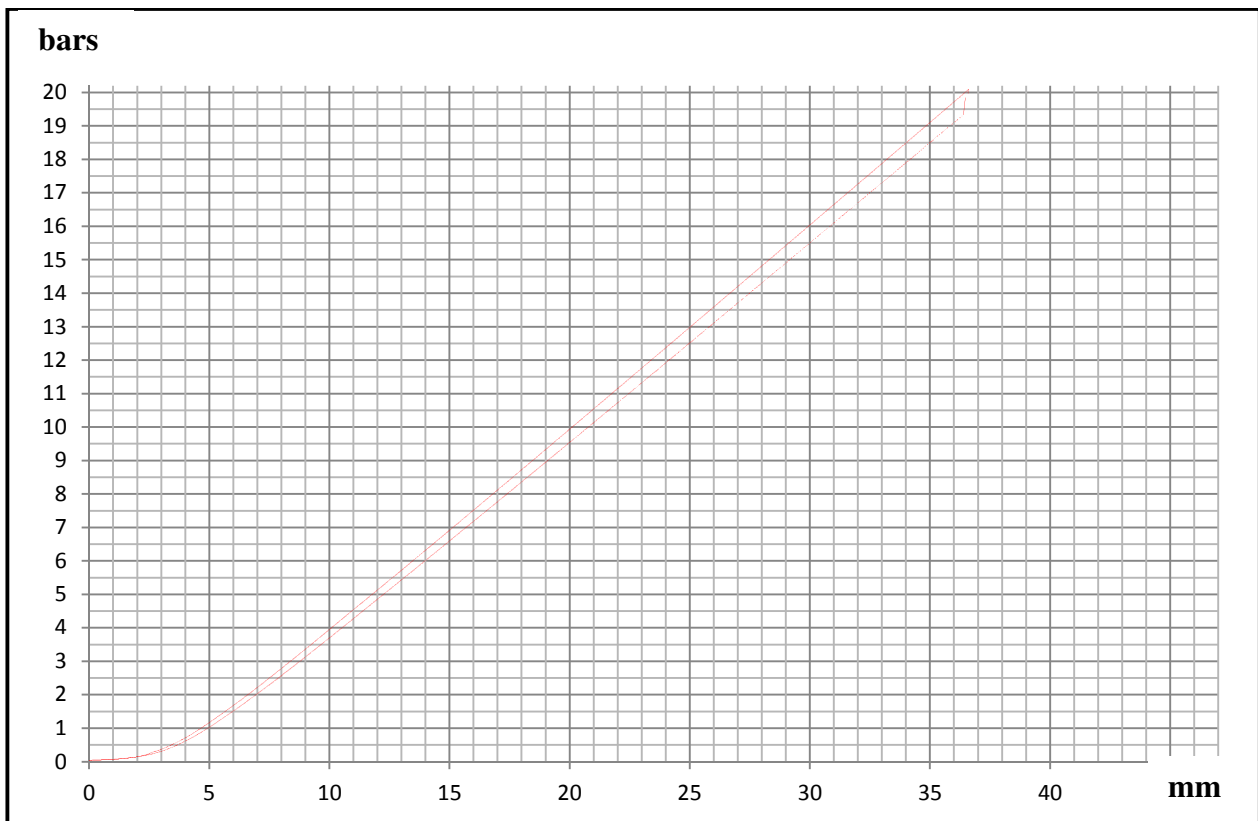


Figure 29 :  $P_r = f(\text{position tiroir})$  - Courbe issue de la PFH

Les valeurs caractéristiques sont :

- Une position du tiroir de réglage (T2) de 36,6mm sous une pression réglée de 19,85bars.
- Une hystérésis sur la Pression réglée  $\approx 700\text{mbars}$ .



**Figure 30 :  $P_r = f(\text{position tiroir})$  - Courbe obtenue sur AMESIM**

Les valeurs de calibrage sont :

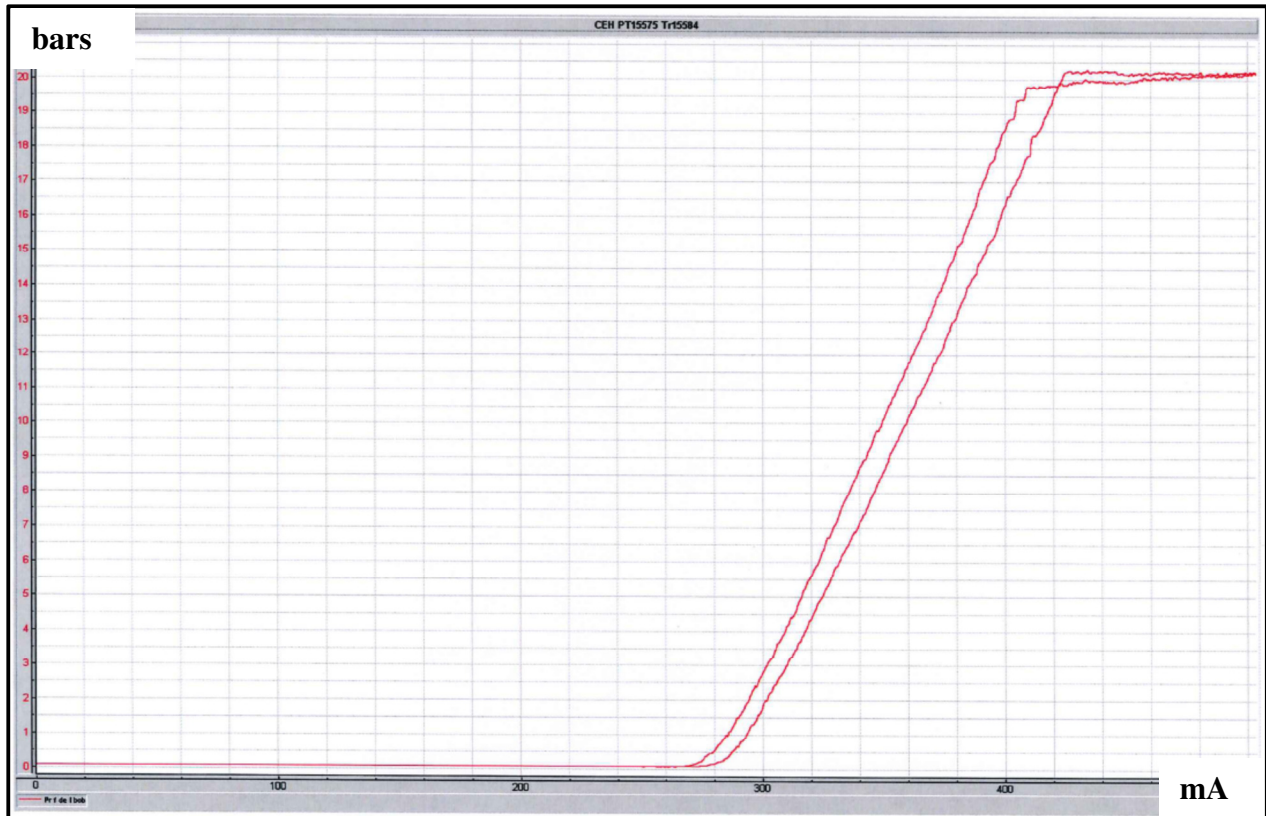
- Une précontrainte du ressort, fixée à 1,15mm au lieu de 0,7mm.
- Une raideur du ressort, fixée à 6,5975mm au lieu de 6,5mm.
- Une force de frottement cinétique (Coulomb friction force) de 37N, afin de retrouver l'hystérésis.



#### d. Vérification du modèle complet

Le but est de comparer la réponse du modèle en intégrant tous les éléments du transducteur jusqu'à la douille manostatique.

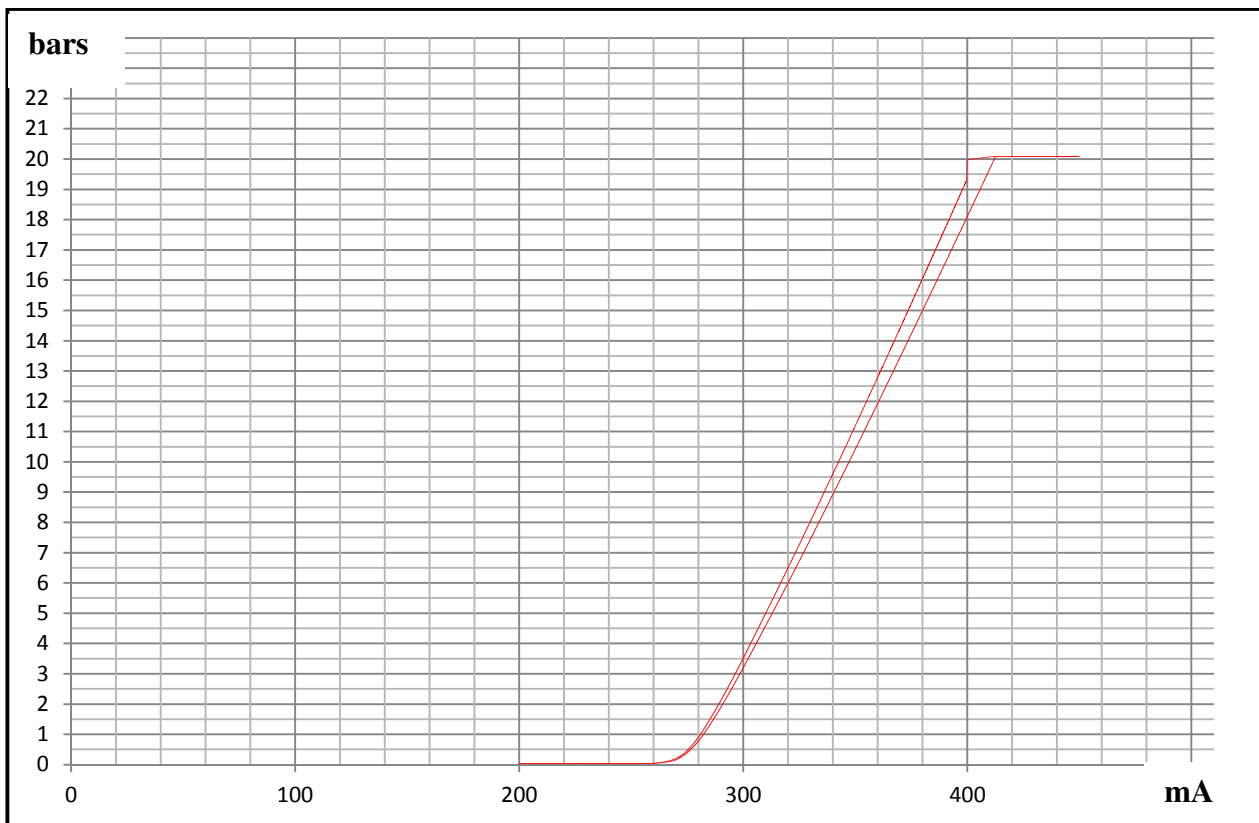
Cette intégration est visible en traçant la courbe Pression réglée = f (I (bobine)). En effet, nous avons sur la même courbe la consigne d'entrée et la pression réglée en sortie du CEH.



**Figure 31 : Pr = f (I (bobine)) - Courbe issue de la PFH**

Les valeurs caractéristiques sont :

- Le début de la course du tiroir, donnée pour  $I \approx 275\text{mA}$ .
- Une hystérèse sur la pression réglée  $\approx 180\text{mbars}$  pour  $380\text{mA}$ .



**Figure 32 :  $P_r = f(I(\text{bobine}))$  - Courbe obtenue sur AMESIM**

On s'aperçoit que la valeur de consigne de début du mouvement du tiroir est respectée. L'hystérésis quant à elle atteint  $\approx 50\text{mbars}$  au lieu de  $180\text{mbars}$  pour  $380\text{mA}$ .

Cet écart s'explique par le fait que nous n'avons pas pris en compte dans le modèle numérique l'hystérésis au niveau du transducteur. Une investigation est en cours pour intégrer ce paramètre bien que cette hystérésis ait peu d'influence sur le phénomène de pompage.

#### 4. Validation dynamique du modèle

Nous sommes en condition d'exploitation :

- Le fluide défini est du FYRQUEL (fluide ester phosphate)
- Boucle de régulation fermée (Liaison vers les pilotes de servomoteur et avec carte RBP)

##### a. Vérification de la carte RBP : Consigne = mesure

A noter que ce type de tracé n'est jamais réalisé en réel.

Les valeurs caractéristiques sont :

- Décollage du tiroir à 0,5V.
- Fin de course tiroir à 32mm pour 10V.

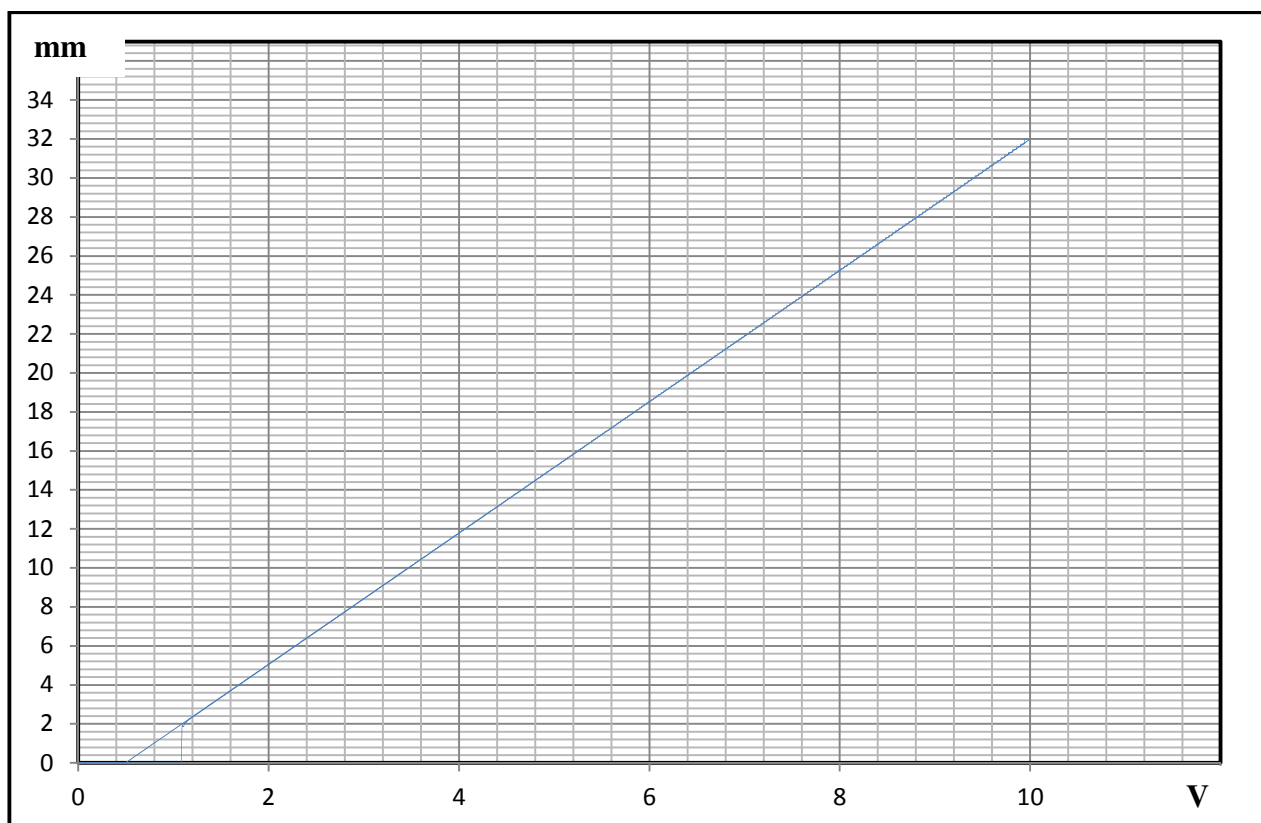


Figure 33 : Position tiroir = f (consigne) - Courbe obtenue sur AMESIM

On s'aperçoit que la carte RBP réalise bien la fonction « consigne = mesure », elle corrige l'hystérésis créée par le frottement du tiroir de réglage.

Le décalage en début de mouvement du tiroir s'explique par le fait que la dérivée est négative et tend vers l'infini lorsque la mesure de position est inférieure à 0,5mm, la mesure doit donc rattraper son retard pour atteindre la consigne, d'où le mouvement soudain du tiroir à  $\approx 1,1V$ .

### b. Vérification de la réponse sur un statique

La valeur caractéristique de fonctionnement est 8,15V pour 13,4bars de pression réglée. Cette valeur cible s'obtient en réglant les paramètres « P et I » de la carte RBP.

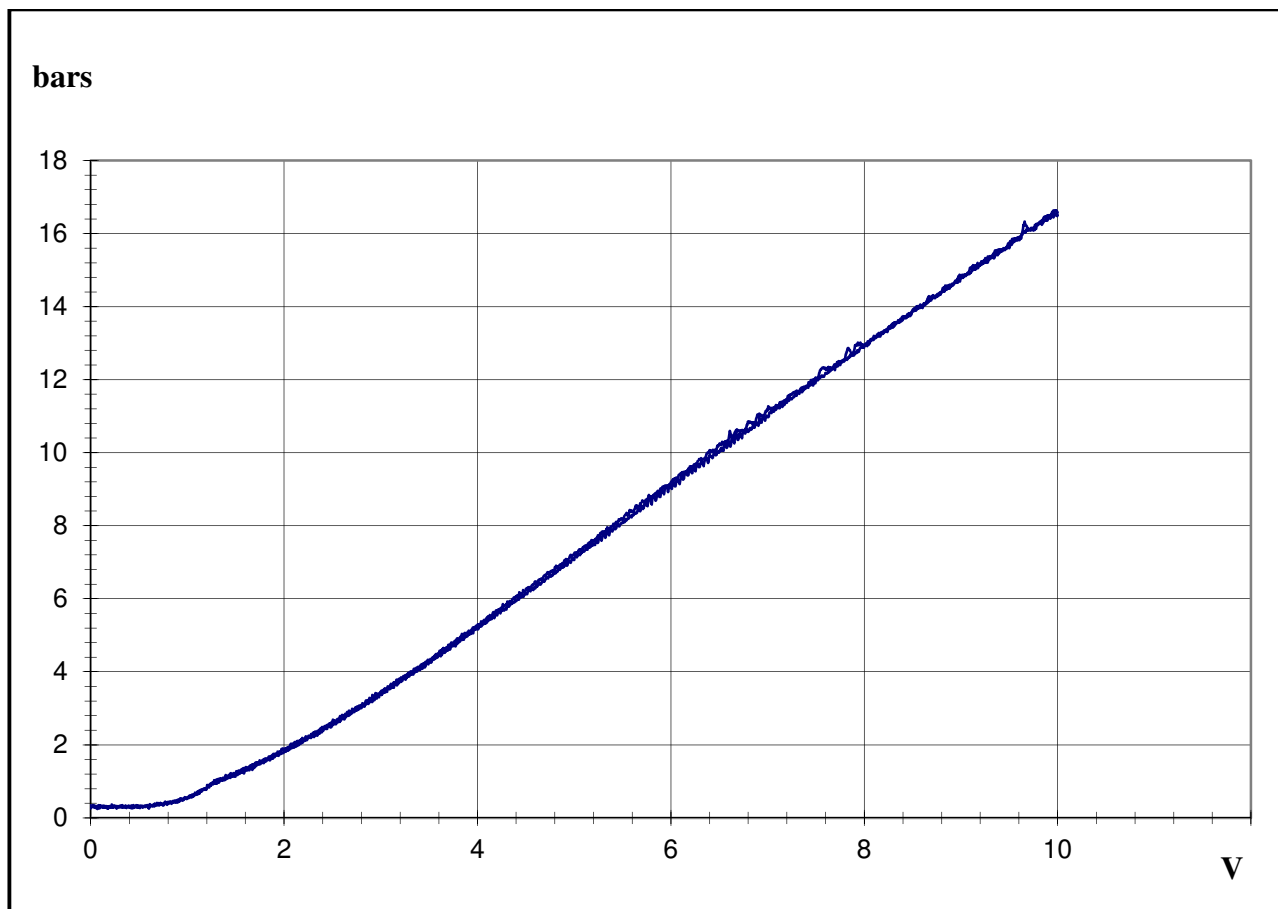


Figure 34 :  $P_r = f(\text{consigne})$  - Courbe issue d'un essai sur site

Le but est de d'obtenir du modèle numérique une courbe correspondant à celle réalisée en exploitation ci-dessus. La courbe obtenue devra également coller au protocole établi.

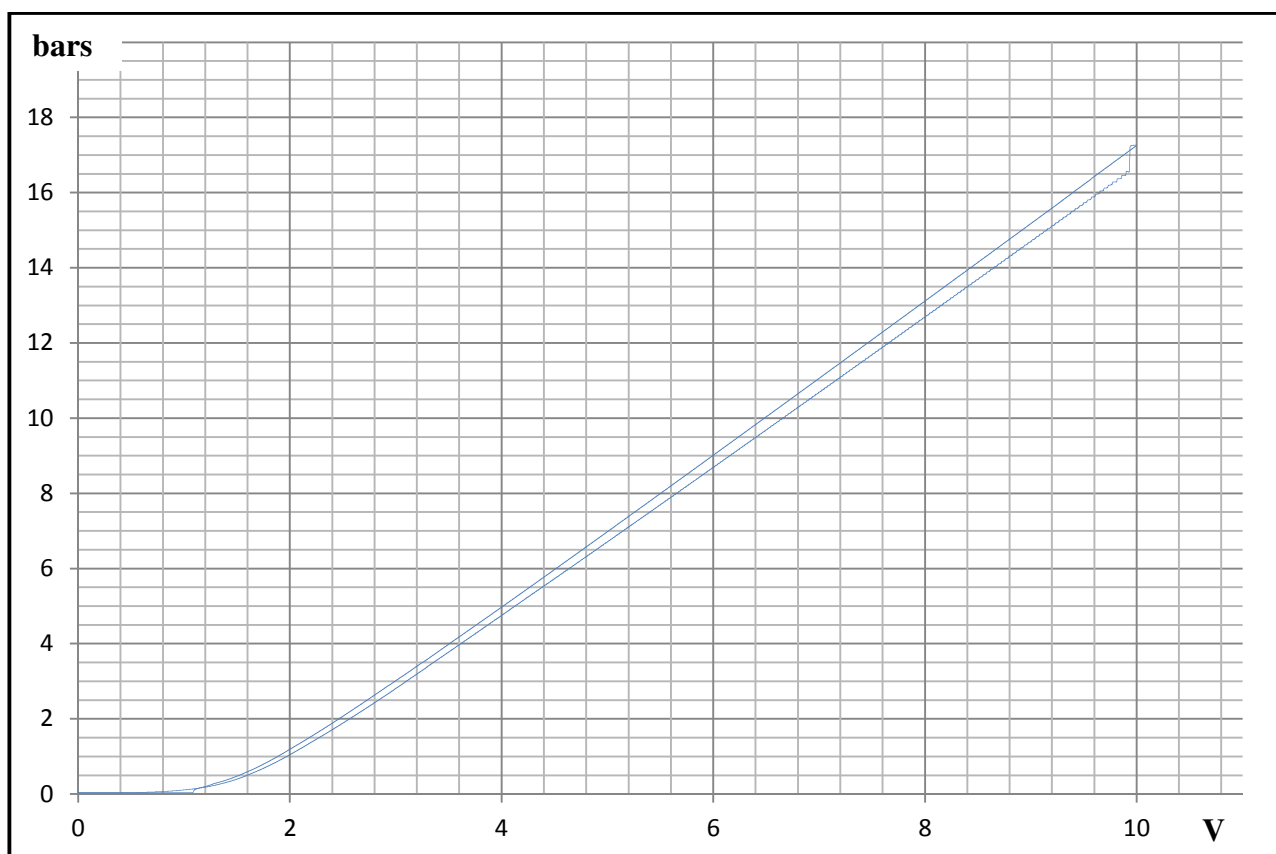


Figure 35 :  $P_r = f(\text{consigne})$  - Courbe obtenue sur AMESIM

L'allure de la courbe est conforme aux critères des spécifications ALSTOM. On retrouve la valeur caractéristique de 8,15V pour 13,4bars de pression réglée.

### c. Vérification de la réponse en dynamique

Le but est de voir si nous retrouvons les pompages avec notre modèle numérique. Pour ce faire nous avons tracé l'évolution de la pression réglée en fonction du temps.

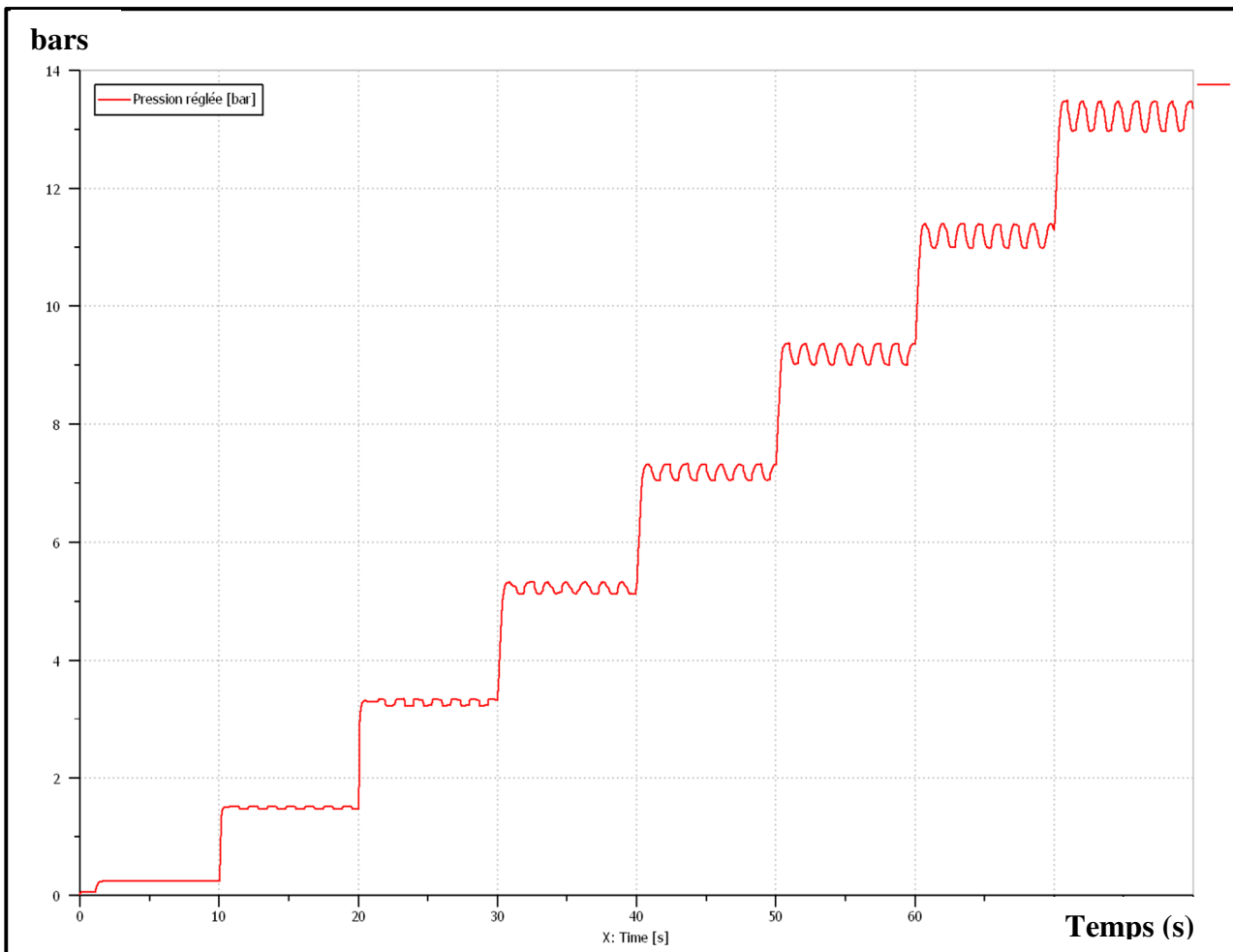


Figure 36 :  $P_r = f(t)$  avec échelon de consigne

#### ➤ Paramètres de simulation

Consigne : échelons de 1 à 8V.

Paramètres de la carte RBP :  $P = 1,5$  et  $I = 7,5$

Coefficient de frottement visqueux (viscous friction) =  $0 \text{ N}/(\text{m}/\text{s})$ . Ce paramètre est déjà intégré dans les modèles hydrauliques utilisés.

Les forces de frottement cinétique (du tiroir de réglage et de la douille manostatique ont été calibrés (Coulomb friction force) lors de la vérification statique du modèle :  $F_c$  tiroir =  $21\text{N}$  et  $F_c$  douille =  $37\text{N}$ .

En se basant sur les résultats obtenus sur site (Figure 34 :  $P_r = f$  (consigne) - Courbe issue d'un essai sur site), nous avons visualisé une fréquence des pompages de l'ordre de 1Hz. Nous avons donc procédé à un ajustement de la force de frottement de décollage (Stiction force) pour obtenir un signal de sortie de la pression réglée d'une fréquence de 1Hz.

Cela nous a permis d'obtenir les valeurs suivantes :  $F_s$  tiroir = 23N (+10%) et  $F_s$  douille = 40N (+8%).

➤ *Analyse*

Cette dernière vérification et ce dernier calibrage permet de valider le modèle numérique et donc de l'exploiter. En effet, nous retrouvons l'instabilité du système via des oscillations de la pression réglée. Au vu de la Figure 36 :  $P_r = f$  (t) avec échelon de consigne, l'amplitude des pompages augmentent en fonction de la position du tiroir de réglage. Ce phénomène avait été visualisé lors des essais sur la centrale de CATTENOM 4 (Figure 50 : Pompage de l'ensemble des paramètres avec consigne en rampe lente)

## 5. Simulation

### a. Forces de frottement

➤ Condition

Hystérésis nulle sur le tiroir de réglage puis sur le tiroir et la douille manostatique.

➤ *Résultat*

Très peu de pompage ou pas du tout. Instabilité en pression réglée haute.

➤ *Constat*

Les forces de frottement influent beaucoup sur le comportement du système. L'hystérésis mécanique est donc un paramètre à diminuer.

## b. Diaphragme d'alimentation

### ➤ Paramètre

Augmentation du diamètre de diaphragme à 4,5mm.

### ➤ Résultat

L'amplitude des pompages de la pression réglée pour une consigne de 8V n'a pas changé.

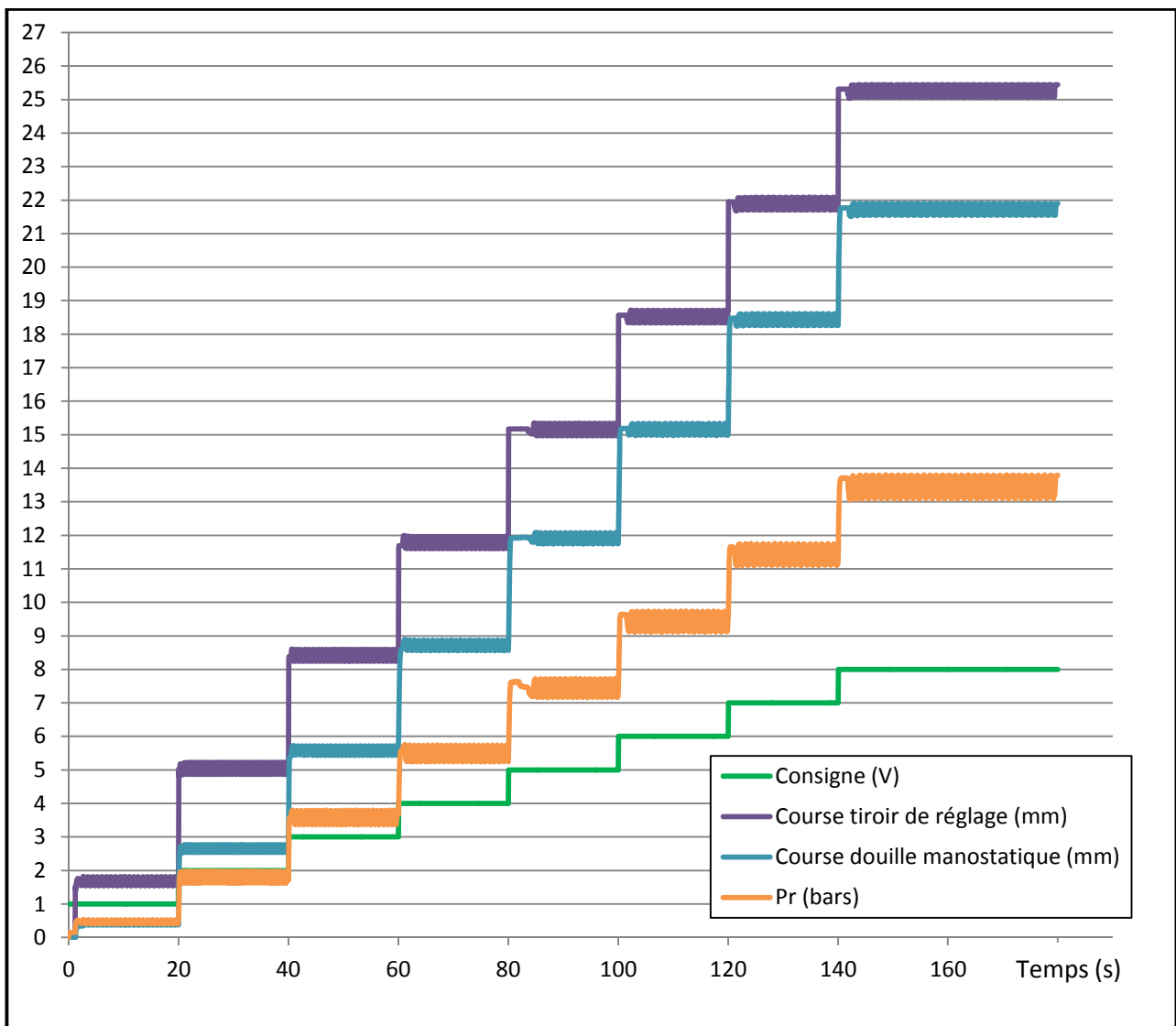


Figure 37 :  $P_r = f(t)$  avec diaphragme de 4,5mm. Courbe obtenue sur AMESIM

### ➤ Constat

Comme constaté précédemment (§3 Comparaison des différents types de CEH sur le palier P'4 (turbine 1300MW)), ce paramètre n'influe pas sur le pompage.



c. Lumière de réglage

➤ Paramètre

Réduction de l'angle de la lumière de réglage à 90°.

➤ Résultat

L'amplitude des pompages de la pression réglée pour une consigne de 8V n'a pas changé.

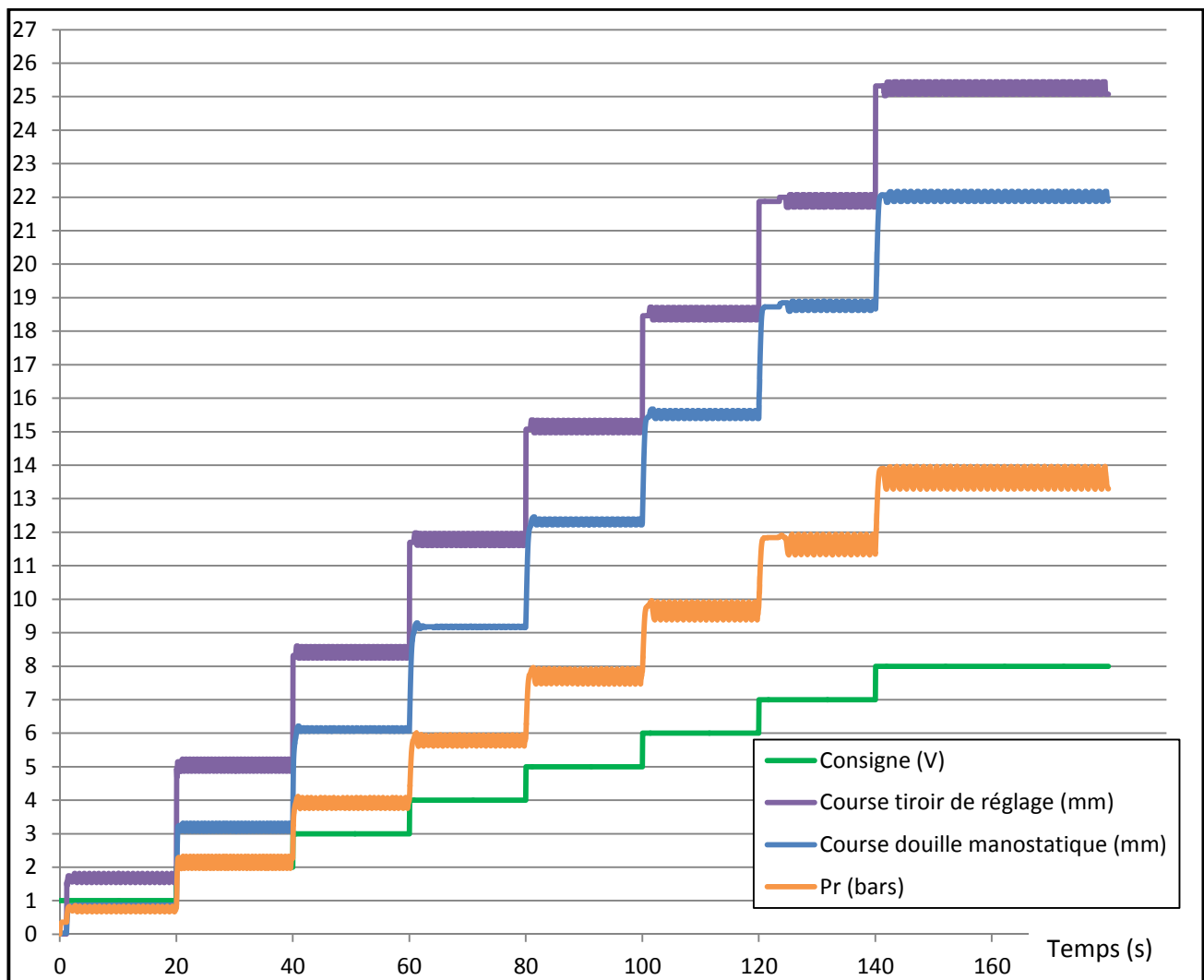


Figure 38 :  $P_r = f(t)$  avec lumière à 90°. Courbe obtenue sur AMESIM

➤ Constat

Comme constaté précédemment (§3 Comparaison des différents types de CEH sur le palier P'4 (turbine 1300MW)), ce paramètre n'influe pas sur le pompage.

d. Action intégrale (I)

➤ Paramètre

I = 2 au lieu de 7,5 (P = 1,5)

➤ Résultat

L'allure du signal de sortie est perturbée mais on peut tout de même constater une atténuation des pompages de la pression réglée.

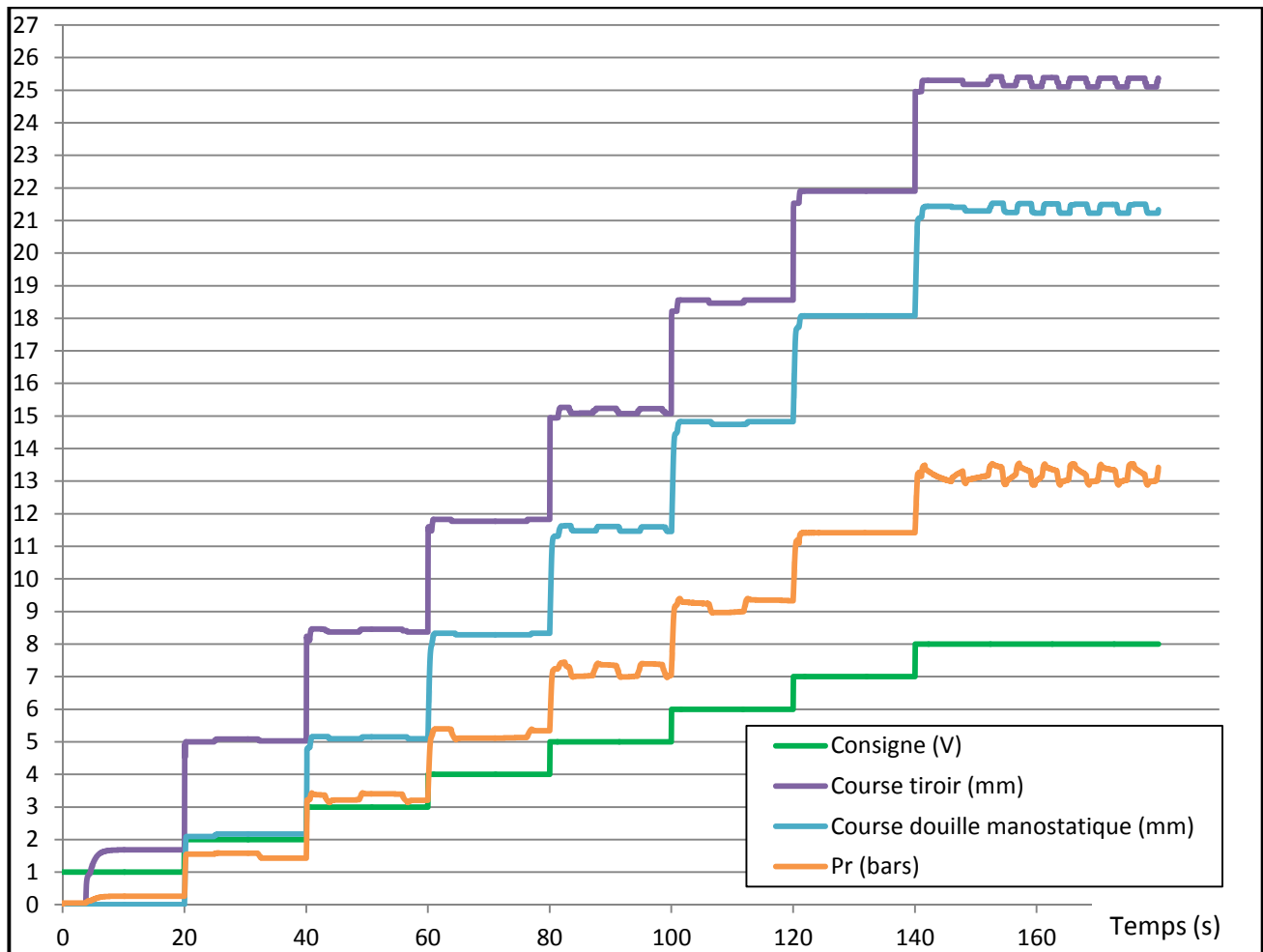


Figure 39 : Pr = f (t) avec I = 2. Courbe obtenue sur AMESIM

➤ Constat

Comme constaté précédemment lors des essais sur le site de PENLY 2 (§2.Essais entrepris sur le site de PENLY tranche 2), ce paramètre permet de limiter les pompages.

e. Action proportionnelle (P)

➤ Paramètre

P = 0,5 au lieu de 1,5 (I = 2)

➤ Résultat

L'allure du signal de sortie est perturbée mais on peut tout de même constater une absence de pompages de la pression réglée.

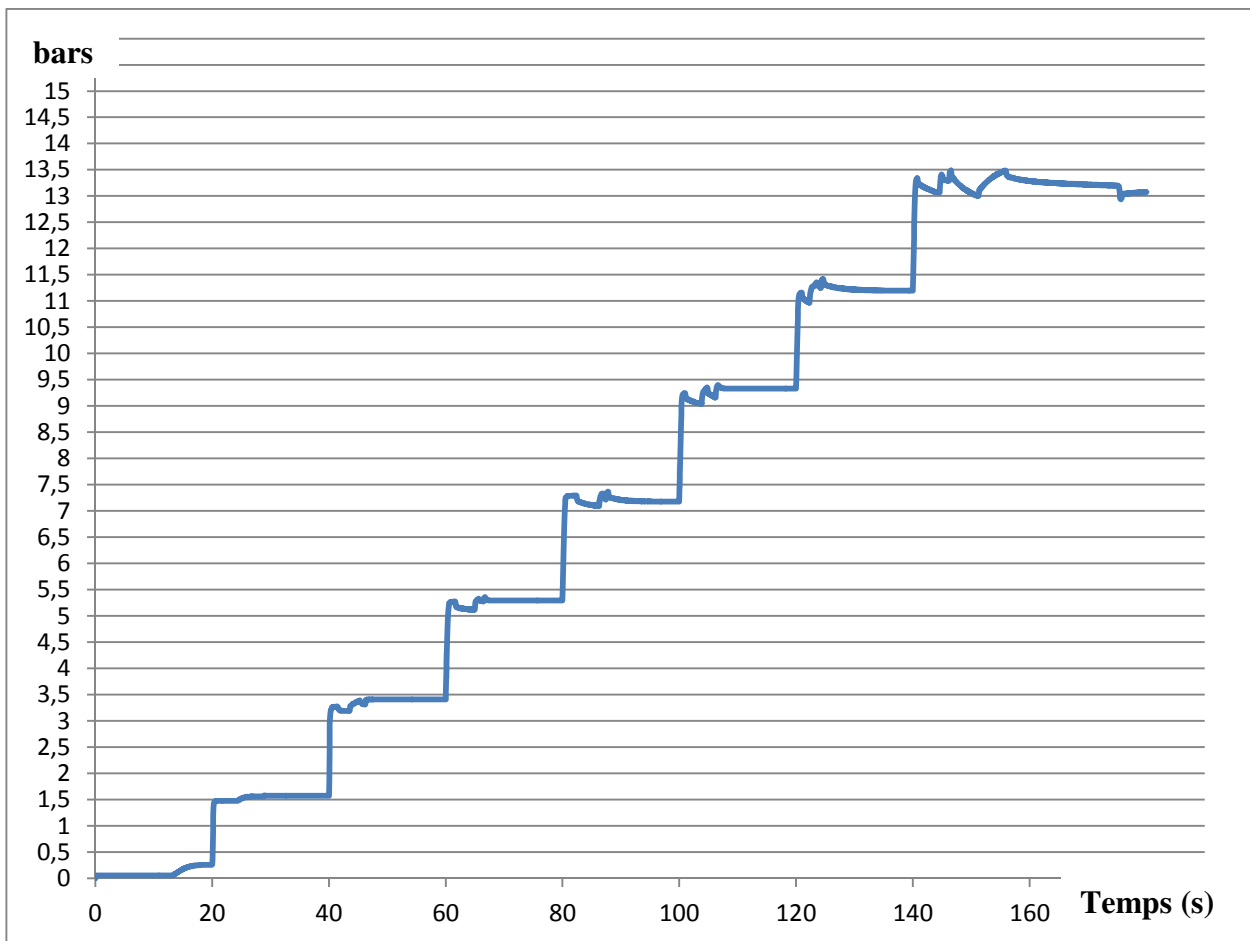


Figure 40 :  $P_r = f(t)$  avec P = 0,5. Courbe obtenue sur AMESIM

➤ Constat

En le couplant avec un paramètre I faible, la diminution de ce paramètre permet de supprimer les pompages. Comme constaté précédemment lors des essais sur le site de PENLY 2 (§2.Essais entrepris sur le site de PENLY tranche 2), ces valeurs ne pourront satisfaire aux critères PIS.

## **VI. Solutions proposées**

### 1. Optimisation des systèmes installés

#### **a. Réglages du régulateur de la boucle de position**

Une optimisation des paramètres P, I et D est nécessaire pour réduire les pompages. Cette solution devra être réalisée en coordination avec les équipes ALSTOM dédiées à la régulation électronique.

Ce constat se base sur les résultats d'essais réalisés sur le site de PENLY 2 et également sur les résultats de la simulation numérique.

#### **b. Fonctionnement hydromécanique**

##### **➤ *Caractéristiques physicochimiques du fluide de régulation***

Un fluide de régulation n'ayant pas les caractéristiques physicochimiques imposées par ALSTOM peut avoir des conséquences néfastes sur le fonctionnement du CEH.

Exemples :

- présence de particules qui peut engendrer des frottements anormaux et potentiellement des pompages ;
- dégradation du fluide de régulation qui peut engendrer des dépôts sur les composants mécaniques du CEH Ces dépôts (appelés gommage<sup>xv</sup>) peuvent générer des frottements anormaux et donc potentiellement des pompages. On parlera de phénomène de

Dans ce contexte, ALSTOM préconise un nettoyage systématique de chaque appareil ainsi qu'une analyse de fluide afin de s'affranchir d'un doute de pollution de celui-ci.

##### **➤ *Réduire les frottements***

Suite au constat des résultats de la simulation numérique, j'ai décidé d'étudier l'interface du tiroir de réglage avec le bâti. En effet, il est nécessaire qu'il y ait un minimum de contraintes mécaniques sur le tiroir de réglage.

Par conséquent, une étude des jeux de fonctionnement du tiroir de réglage avec le bâti a donc été menée au sein de notre plateforme d'essais.

But : Améliorer l'étage manostatique au niveau du tiroir de réglage afin de pouvoir avoir une géométrie et un jeu de fonctionnement moyen maîtrisés.

Amélioration de la conception : Annexe 7 : Plan amélioration mécanique du bâti

L'amélioration est réalisée de la façon suivante :

- usinage des 3 interfaces de guidage du tiroir de réglage localisées sur le chapeau et le bâti afin d'insérer les douilles de réparation ;
- assemblage des douilles de réparation dans le chapeau et le bâti ;
- assemblage du chapeau sur le bâti à l'aide des vis de fixation ;
- réalisation d'un piétage entre le chapeau et le bâti afin de retrouver le même positionnement lors des remontages ;
- usinage des 3 diamètres D, D2 et D3 correspondant aux interfaces de guidage du tiroir de réglage. Cet usinage permet de réaliser une concentricité entre chaque interface et d'assurer ainsi une géométrie parfaite ;
- mise en place de l'étanchéité et des goupilles de blocage.

Définition du jeu moyen de fonctionnement : Après avoir effectué l'amélioration mécanique du bâti manostatique, il reste à appairer un tiroir prototype en définissant une valeur de jeu. La méthodologie est de partir d'une valeur de jeu minimum qui pourra être agrandi, en ré-usinant le tiroir, si les résultats ne sont pas acceptables.

Un plan de définition du tiroir de réglage a donc dû être réalisé dans l'objectif de pouvoir le modifier si besoin au cours des essais. Annexe 8 : Plan du tiroir

Conditions d'essais : En l'absence de régulateur de position, les essais sont réalisés à l'aide d'un générateur de courant électrique en boucle ouverte. Nous allons étudier la course du tiroir de réglage en fonction du signal électrique.

Essai n°1 : Mise en place du tiroir de réglage prototype dans le nouveau bâti manostatique. Il est à noter que le tiroir n'est pas nitruré<sup>xvi</sup> afin de pouvoir réaliser plus aisément les opérations d'usinage.

Le jeu de fonctionnement réalisé au niveau des interfaces des douilles et du tiroir de réglage s'étend de 0,02mm à 0,03mm sur les 3 diamètres concernés.

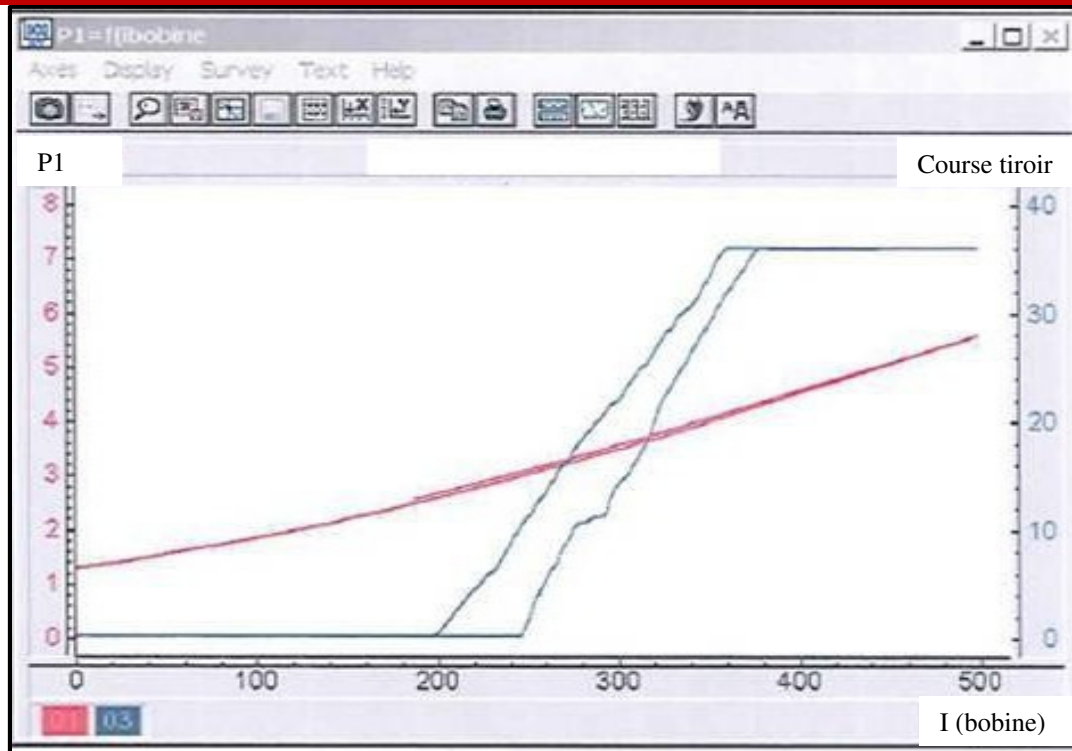


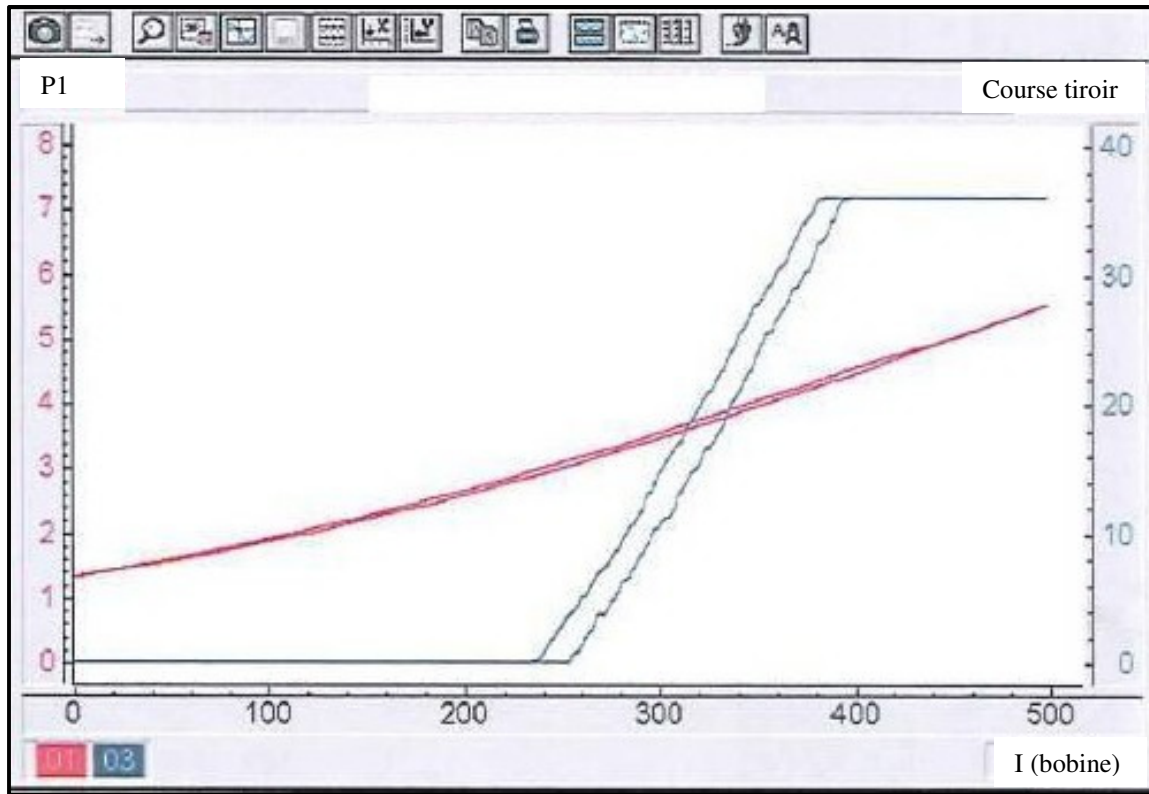
Figure 41 : P1 et course tiroir = f (I (bobine)).

- La courbe  $P1 = f(I(\text{bobine}))$ , en rouge, ne présente pas d'anomalie.
- La courbe  $\text{Course tiroir} = f(I(\text{bobine}))$ , en bleu, présente une anomalie. La courbe à la montée présente une cassure. De plus on constate une hystérésis important entre le début de la montée et la fin de la descente.

Le jeu de fonctionnement entre le tiroir de réglage et les douilles est trop réduit. En effet, ce jeu réduit provoque un point dur qui explique la cassure. Il est donc nécessaire d'agrandir le jeu de fonctionnement en ré-usinant le tiroir de réglage en s'approchant de la plage moyenne du jeu de fonctionnement théorique.

Essai n°2 : Mise en place du tiroir de réglage prototype nouvellement usiné dans le bâti manostatique.

Le jeu de fonctionnement réalisé au niveau des interfaces des douilles et du tiroir de réglage s'étend de 0,038mm à 0,047mm sur les 3 diamètres concernés.



**Figure 42 : P1 et course tiroir = f (I (bobine)) – Après usinage**

- La courbe  $P1 = f(I \text{ (bobine)})$ , en rouge, ne présente pas d'anomalie.
- La courbe  $\text{Course tiroir} = f(I \text{ (bobine)})$ , en bleu, ne présente plus d'anomalie. L'hystérésis a diminuée et les droites sont parfaitement parallèles entre la montée et la descente.

L'augmentation du jeu de fonctionnement a permis de réduire l'hystérésis.

La stabilité de la courbe  $P1=f(I \text{ (bobine)})$  montre que le transducteur et le 1<sup>er</sup> étage ont gardé le même comportement pendant les essais. Ce constat permet de valider les résultats sur l'influence du jeu de fonctionnement dans le fonctionnement du tiroir.

Un jeu de fonctionnement moyen a donc été défini entre le tiroir de réglage et son logement dans le bâti manostatique. Le critère sera uniforme à tous les diamètres d'interfaces et sera compris entre 0,04mm et 0,05mm au diamètre. Voir Annexe 9 : Tableau jeux fonctionnels

Des essais supplémentaires devront être réalisés afin de réduire de nouveau cette hystérésis. Le but est d'analyser le comportement d'autres éléments dans l'étage manostatique comme l'interface mécanique tiroir de réglage/douille manostatique ou bien le tiroir de réglage seul sans la partie manostatique. De plus, une étude de matériau des bagues de réparation peut être entreprise afin de réduire le coefficient de frottement entre le tiroir de réglage et les douilles.

## 2. Remplacement des systèmes installés

### a. Le régulateur de la boucle de position

EDF voudrait moderniser la régulation électronique des paliers P'4 car la régulation MICROREC tend à devenir obsolète. Pour répondre à ce besoin nos collègues de l'entité PAC ont conçus une nouvelle carte « SPC160A » prête à être installée sur site. Cette modification engendrerait une requalification complète du système de régulation de la turbine.

### b. Remplacer l'appareil

Une modification complète de la régulation a été réalisée sur la centrale KNU à Ulchin en République de Corée. Cette modification consistait à transformer la régulation centralisée par une régulation décentralisée. Une régulation décentralisée permet d'avoir un appareil de commande pour chaque servomoteur (Voir explication page 6).

Les CEH ont donc été remplacés par des amplificateurs électrohydrauliques avec une servocommande type « VICKERS ».



**VII. Annexes**

➤ *Annexe 1 : Relevés réalisés dans le cadre d'une maintenance sur site*

<b>ALSTOM</b>		IBV RX0268 F 53/60				
<b>CONTROLES ET ESSAIS DE MAINTENANCE</b>						
Site : CATTENOM	Tranche : 3	REE	Ind. : Page : /			
<b>RE N°21 : Fonctionnement statique des CEH, organes réglants et clapets d'interception</b>						
<b>CEH</b>						
Date du relevé	21/10/2013					
	Pression résiduelle	Consigne au point de début d'évolution de Préglee	Point particulier	Hystérésis		
	Valeur mesurée (bar)	Valeur recommandée (bar)	Valeur mesurée (bar)	Valeur recommandée (mbar)		
CEH HP en //	0,15	0,2 (μREC)	0,78	13,22	8,15 V 13,1 bar	240
CEH HP gauche	0,29		0,85	73,6	8,15 V 13,4bar (μREC)	160
CEH HP droite	0,39	0,5 (μREC)	0,61	13,7		180
			≥ 0,5 ≤ 1,2			≤100
Observations : Hystérésis des CEH acceptable en l'état						

<b>ALSTOM</b>		IBV RX0268 F 57/60	
<b>CONTROLES ET ESSAIS DE MAINTENANCE</b>			
Site : CATTENOM	Tranche : 3	REE	Ind. : Page : /
<b>RE N°22 : Fonctionnement dynamique des CEH et organes réglants</b>			
<b>TEMPS DE MANŒUVRE DES ORGANES REGLANTS HP ET BP</b>			
Date du relevé	21/10/2013		
		Temps de fermeture	Temps d'ouverture*
		Valeur mesurée (s)	Valeur mesurée (s)
		Spécif.** (s)	Spécif.** (s)
		Conforme	Conforme
		OUI NON	OUI NON
Soupape réglante 1 HP	GRE 001 VV	0,18	1,44
Soupape réglante 2 HP	GRE 004 VV	0,17	1,29
Soupape réglante 3 HP	GRE 002 VV	0,18	1,35
Soupape réglante 4 HP	GRE 003 VV	0,15	1,32
		≤ 0,3	≤ 2

➤ *Annexe 2 : Courbes réalisées en boucle ouverte*

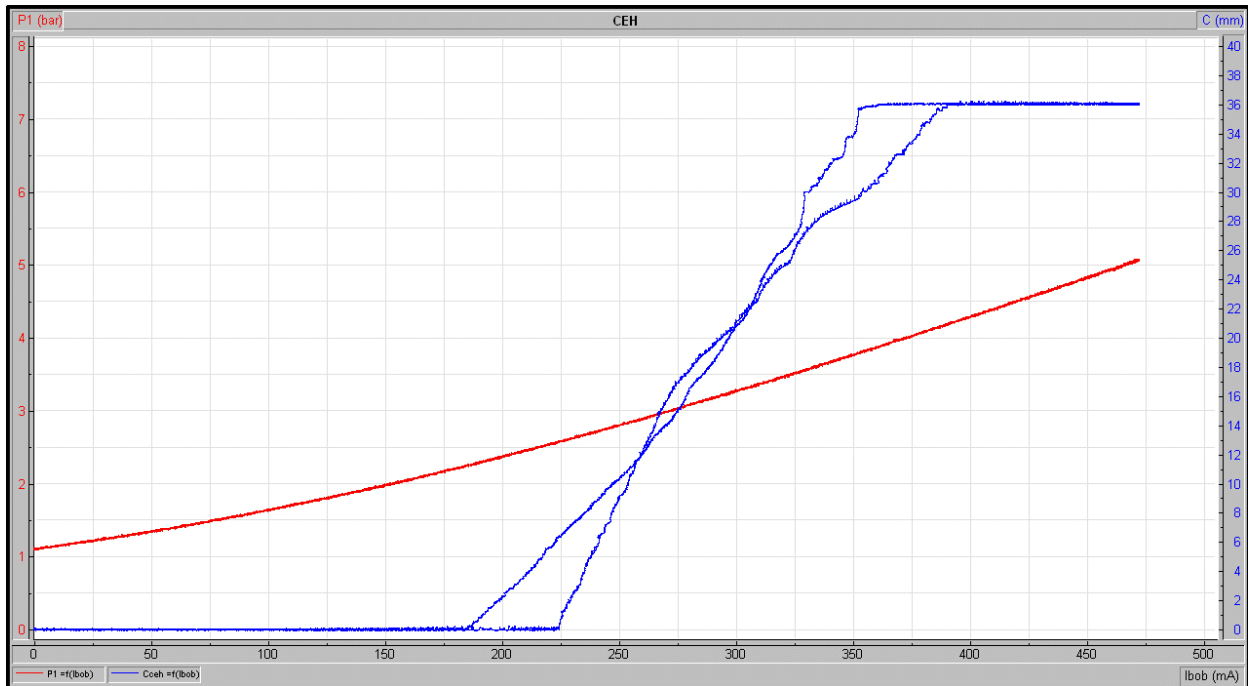


Figure 43 :  $P1$  et course tiroir =  $f(I \text{ (bobine)})$

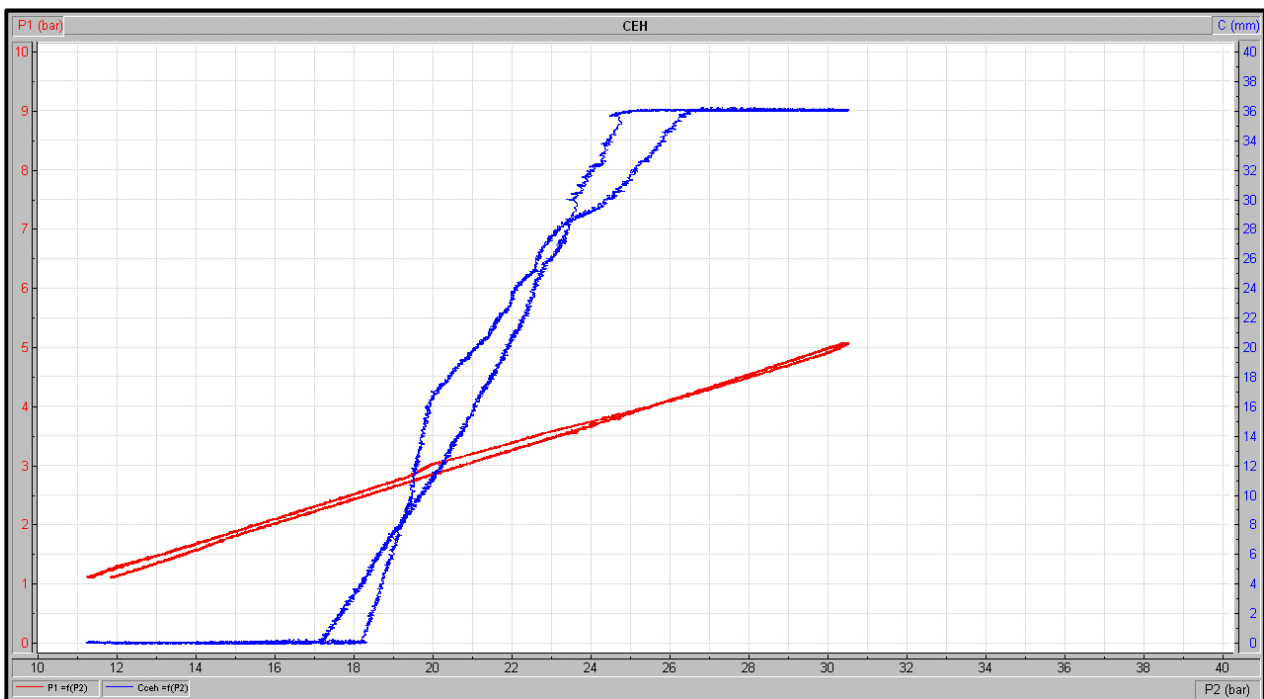


Figure 44 :  $P1$  et course tiroir =  $f(P2)$

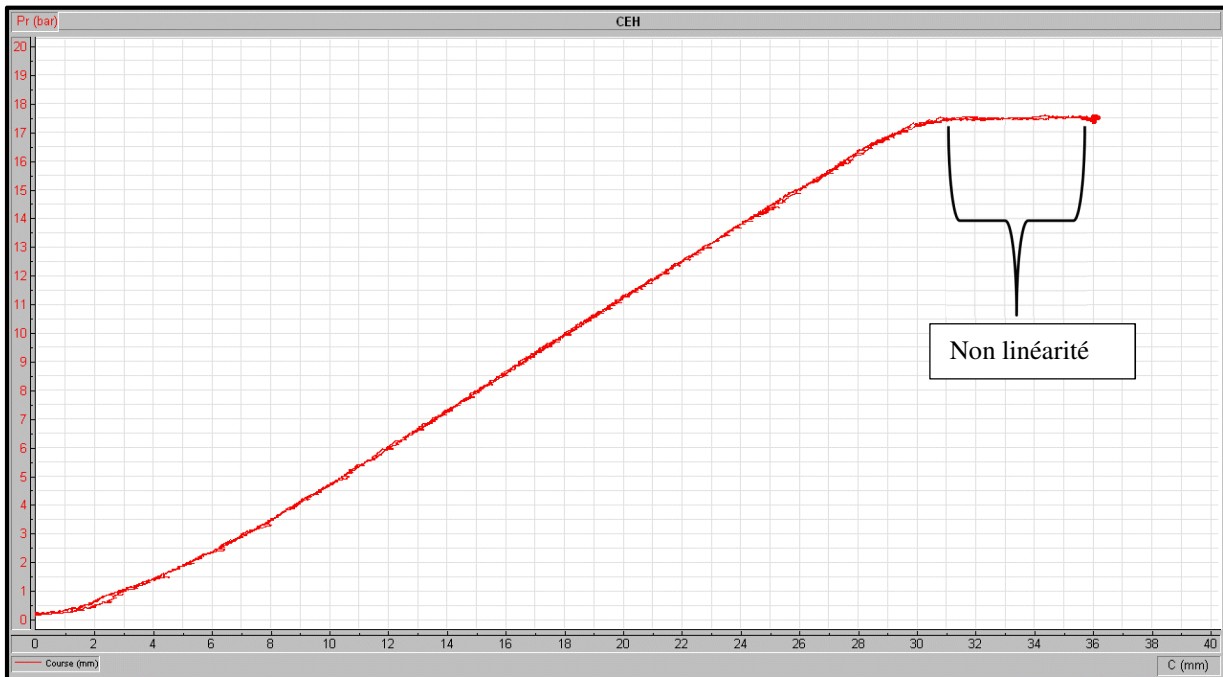


Figure 45 :  $Pr = f(\text{course tiroir})$

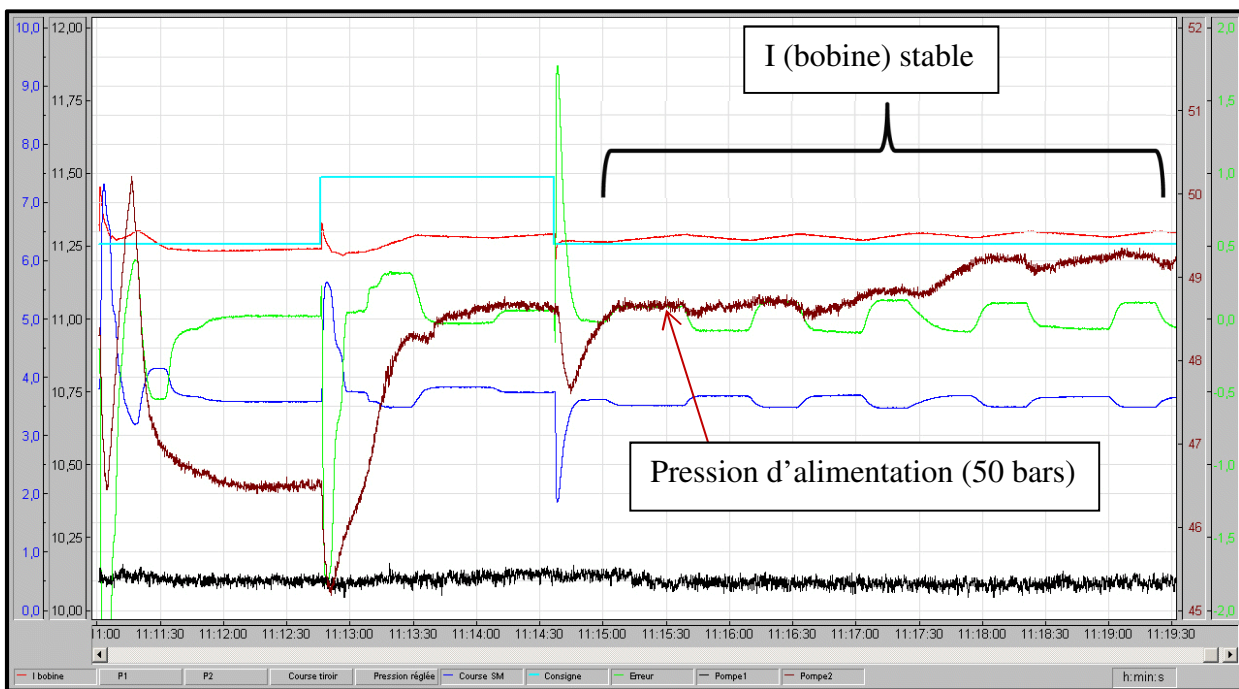


Figure 46 : Instabilité de la pression d'alimentation (50 bars)

➤ *Annexe 3 : Courbes réalisées en boucle fermée sur site*

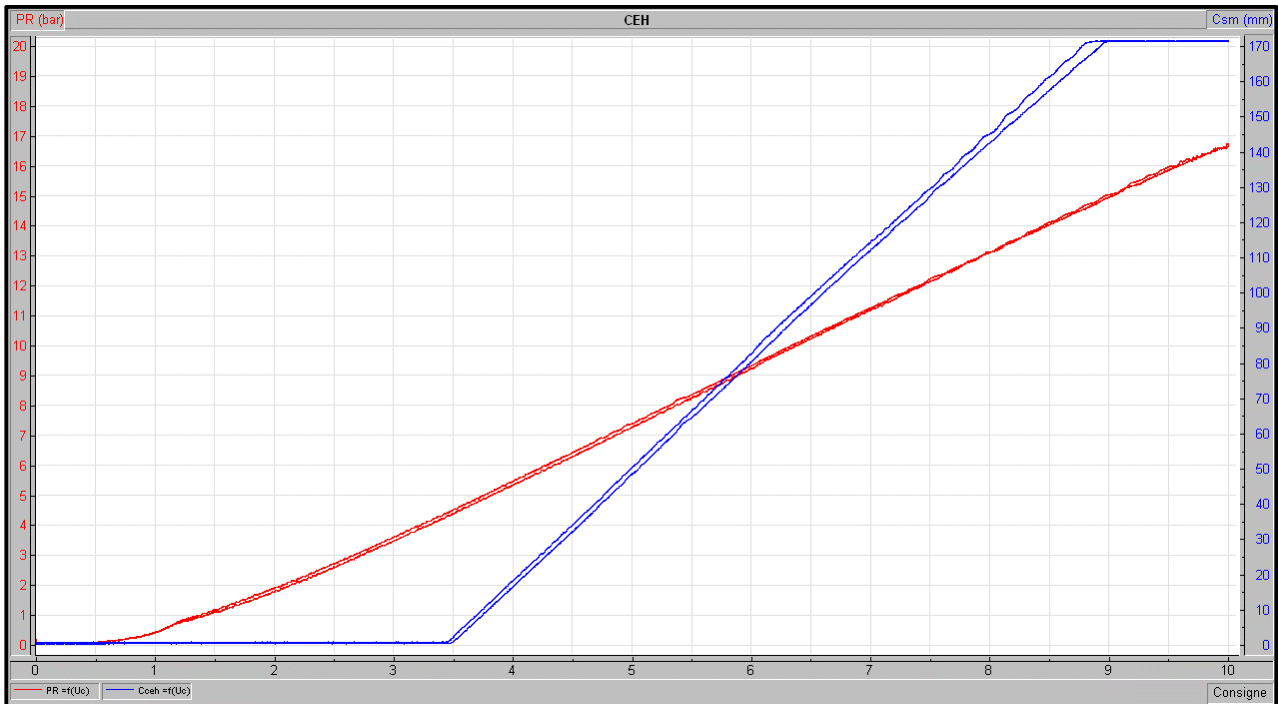


Figure 47 : Pr et course servomoteur = f (consigne)

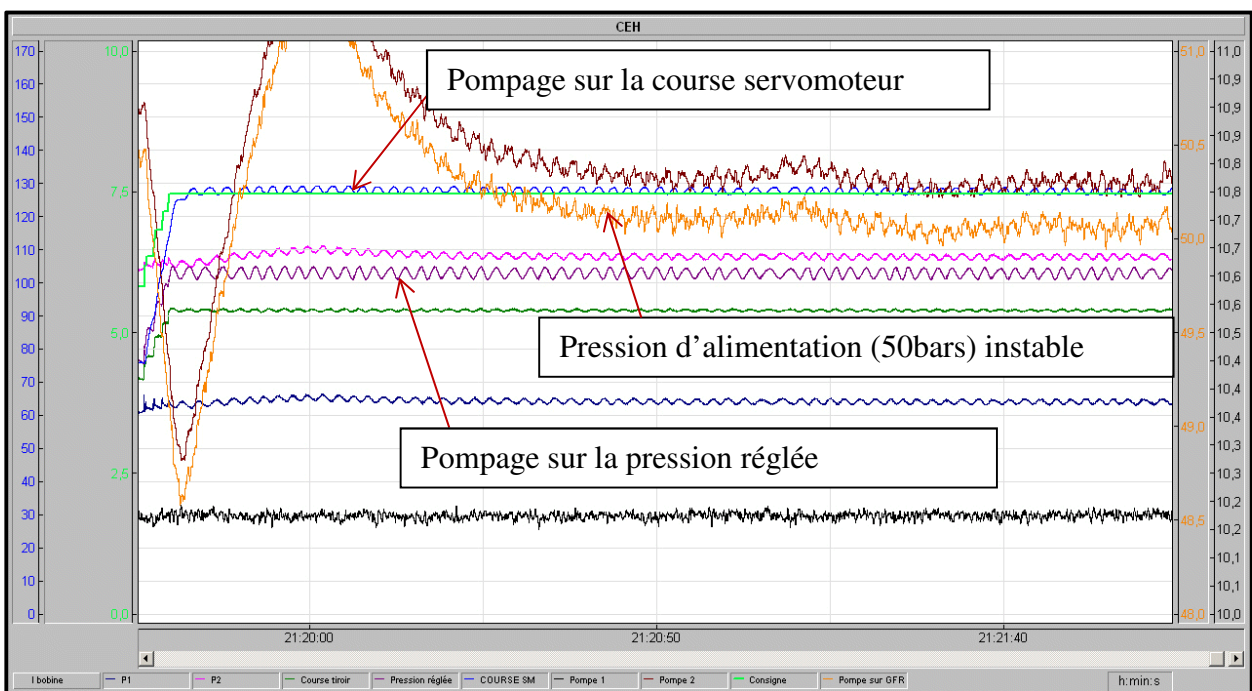


Figure 48 : Pompage de l'ensemble des paramètres avec une pression 50bars instable

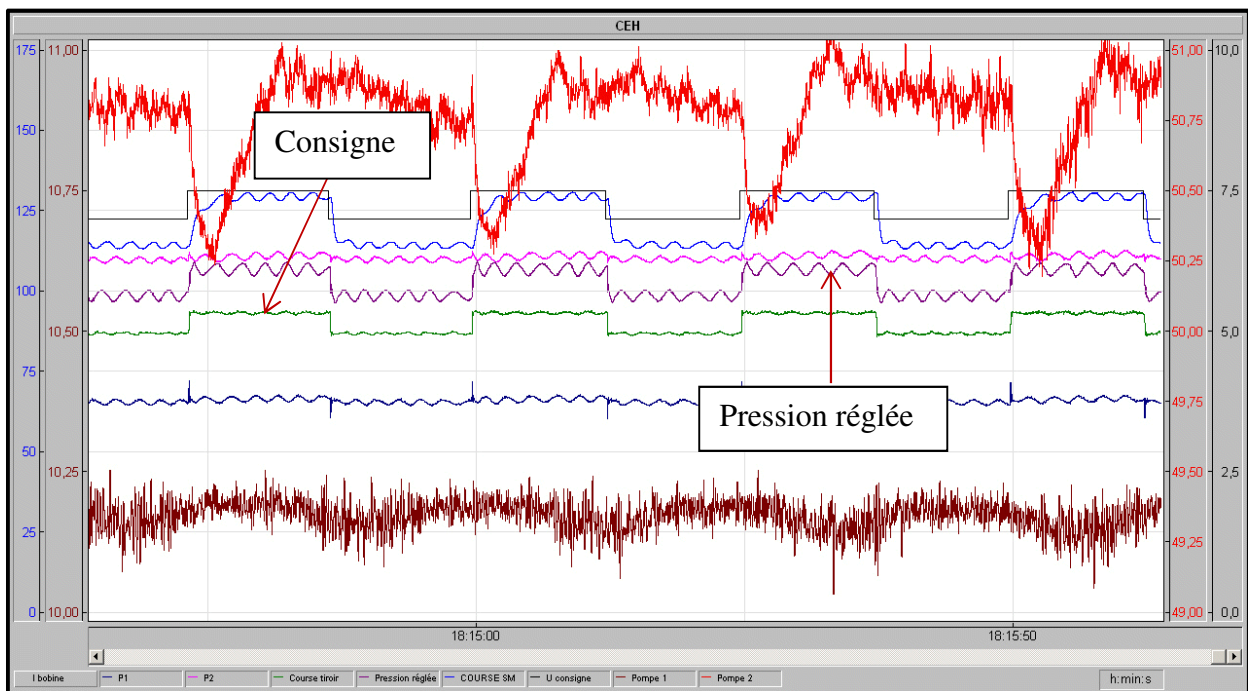


Figure 49 : Pompage de l'ensemble des paramètres avec petits échelons

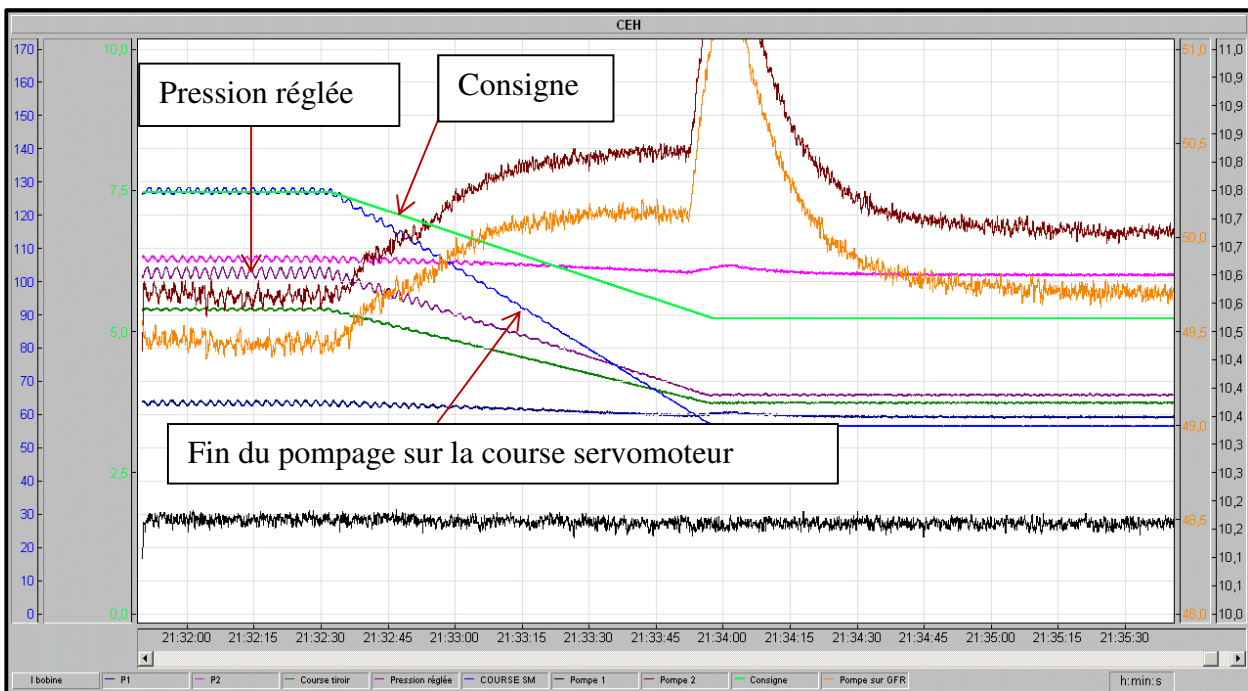
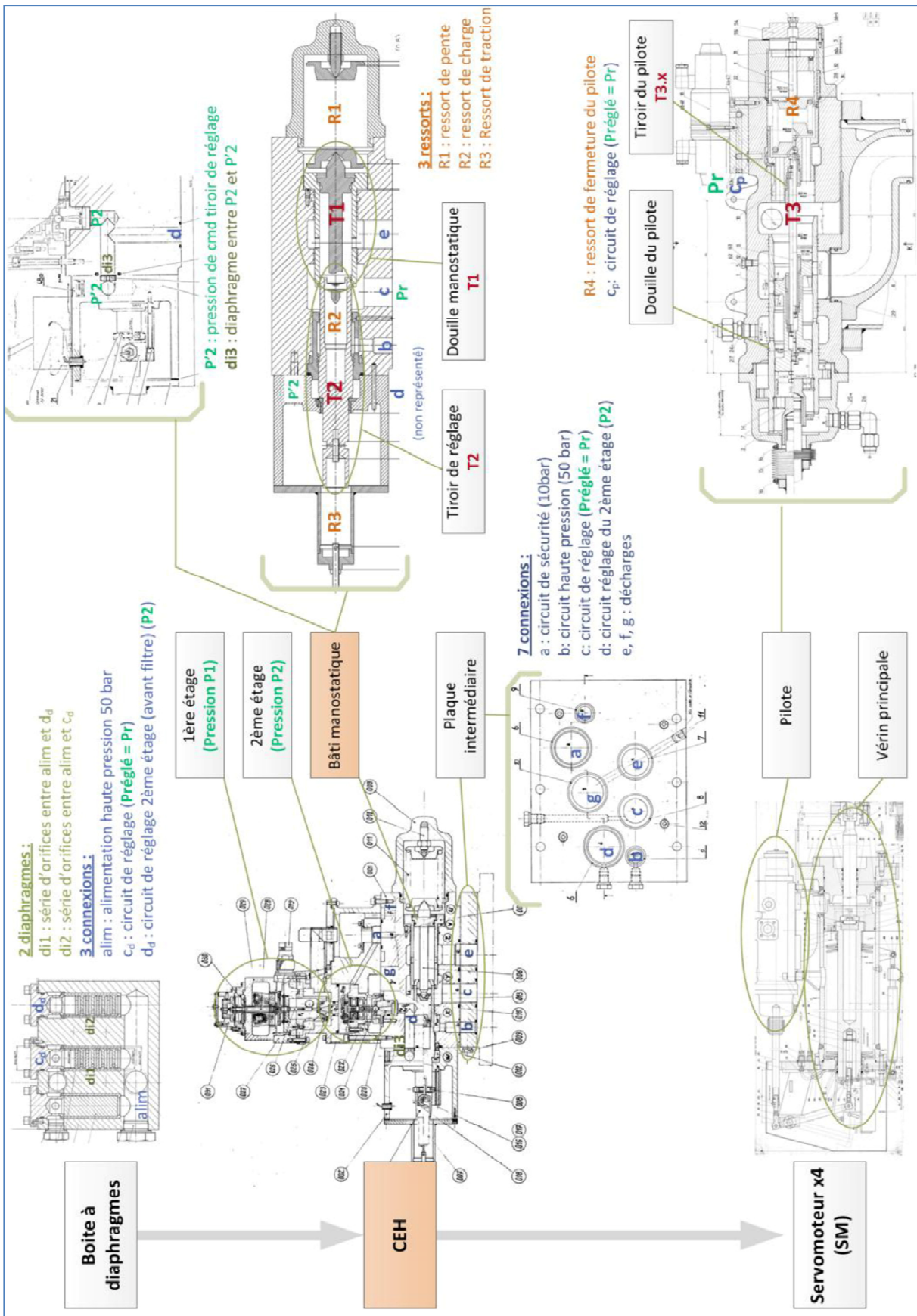


Figure 50 : Pompage de l'ensemble des paramètres avec consigne en rampe lente









➤ *Annexe 4 : Notations utilisées pour la modélisation*









➤ *Annexe 5 : Blocs fonctionnels de la modélisation*





Partie mécanique

 mass_friction_endstops	Masse en translation entre 2 butées mécaniques idéales. La flèche indique le sens positif de déplacement. Frottement configurable. Voir annexe 1
 spring01	Ressort idéal et linéaire : $F = k \cdot x$ . Précontrainte à rentrer sous force de force.
 displacementsensor2	Capteur de déplacement : transforme la position d'un mobile en un signal. La flèche indique le sens positif de déplacement.
 lconnector2	Connexion mécanique idéale.
 zeroforcesource	Terminaison de pièce mécanique.
 zerospeedsource	Point fixe, bâti.







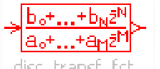
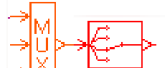
Partie hydraulique

 pressuresource	Source de pression idéale.
 elementaryhydraulicprops	Propriété des fluides utilisés. On place autant de fois cet élément qu'il y a de fluides différent. Voir annexe 2
 flowcontrol01	Orifice hydraulique. Voir annexe 3
 hydraulic_chamber_4_ports	Chambre hydraulique à volume constant. Il calcule la pression en fonction des débits entrants et sortants et de la rigidité du fluide. Plus la chambre est petite plus elle est « rigide », plus la simulation peut être instable. Voir annexe 4
 hydrnode3	Nœud hydraulique. La branche en trait fort (non représenté ici) indique là où la pression est imposée. Généralement, celle-ci est donnée par le sens d'écoulement du fluide.
 tank01	Source de pression nulle.

Composant hydraulique

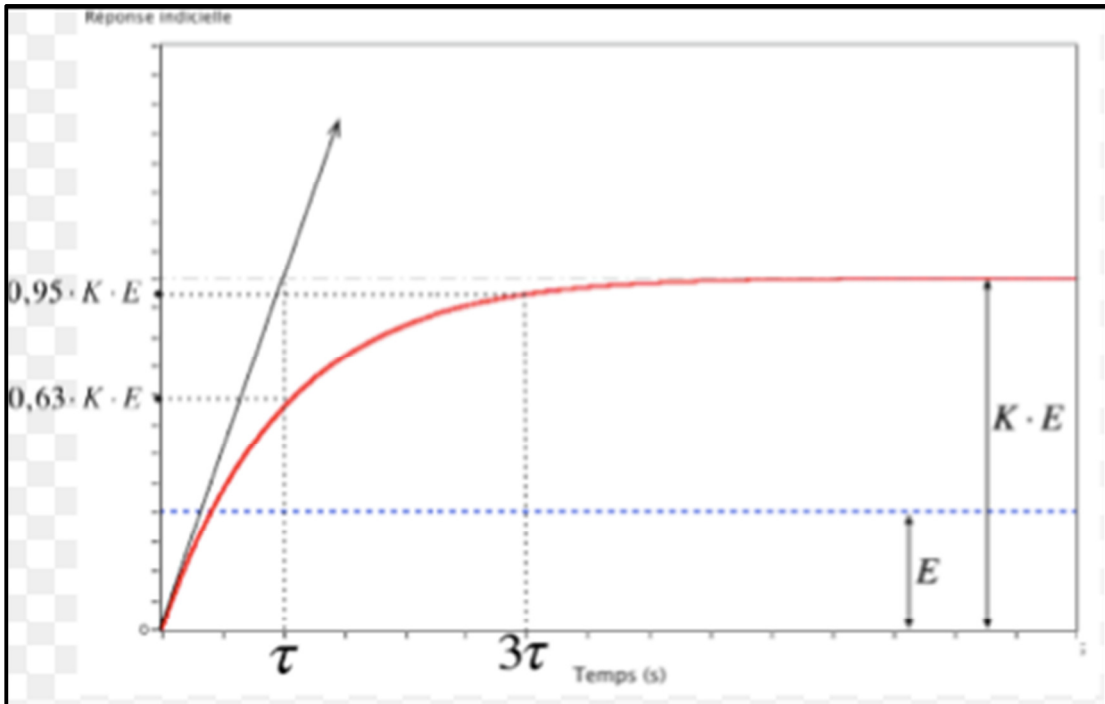
 <p>bap1</p>	<p>Modèle de piston simple + tige. Le bâti est fixe.  <a href="#">Voir annexe 5</a></p>
 <p>baf1</p>	<p>Modèle de frottement visqueux et de fuites.  <a href="#">Voir annexe 6</a></p>
 <p>notchedge_rel01</p>	<p>Modèle douille mobile / tiroir mobile avec encoches configurables sur le tiroir.                  Attention : les 2 entrées mécaniques doivent être obligatoirement du même côté (soit les 2 à gauche, soit les 2 à droite).  <a href="#">Voir annexe 7</a></p>
 <p>bhc1</p>	<p>Chambre hydraulique de volume variable. Ce composant est toujours associé à un composant HCD de type piston. Il calcule la variation de volume en fonction du déplacement du composant auquel il est rattaché. Il calcule également la pression en fonction des débits entrants et sortants et de la rigidité du fluide.  <a href="#">Voir annexe 8</a></p>

Signaux

 <p>signal03</p>	<p>Source signal linéaire et configurable par morceau.</p>
 <p>signal01</p>	<p>Source signal sinusoïdale.</p>
 <p>fofx</p>	<p>Fonction mathématique configurable.</p>
 <p>control10</p>	<p>Saturation du signal haute et basse d'un signal.</p>
 <p>control17</p>	<p>Intégrateur borné</p>
 <p>elect03</p>	<p>Fonction de transfert du 1<sup>ère</sup> ordre.</p>
 <p>disc_transf_fct</p>	<p>Fonction de transfert configurable.</p>
 <p>ramic_switc</p>	<p>Bloc multiplexeur suivi d'un bloc switch. Permet d'avoir plusieurs entrées signales sans changer le sketch.</p>

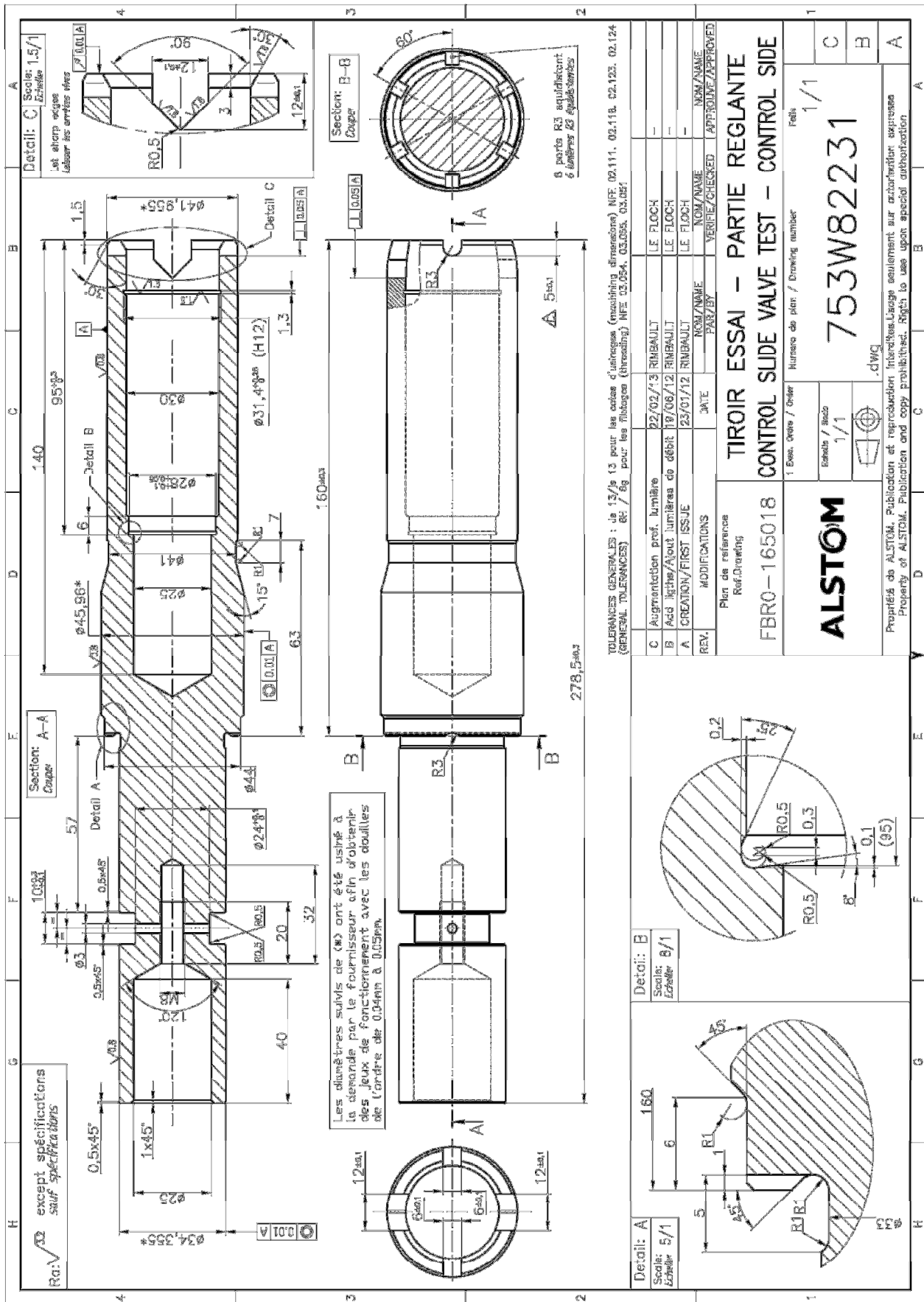


➤ *Annexe 6 : Réponse indicielle théorique d'une fonction transfert du 1er ordre*





Annexe 8 : Plan du tiroir



**MEMOIRE D'INGENIEUR CNAM PARIS**  
**LIMITATION DES POMPAGES DES CONVERTISSEURS ELECTROHYDRAULIQUES**

➤ **Annexe 9 : Tableau jeux fonctionnels**

**Origine**

	Dimensions Origine théoriques				
	Diamètre	Tolérance			
<b>Tiroir</b>	42	-0,02	-0,035		
<i>Plan FBR0-165018</i>	46	-0,035	-0,05		
	34,4	-0,035	-0,05		
<b>Douille</b>	42H6	0	0,016		
<i>Plan FBR1-165019</i>	46H6	0	0,016		
	34,4H6	0	0,016		
	Jeu mini	Jeu maxi	<b>Jeu moyen</b>		
	42	0,02	0,051	<b>0,0355</b>	<b>Tolérance +/- 0,0155mm</b>
	46	0,035	0,066	<b>0,0505</b>	
	34,4	0,035	0,066	<b>0,0505</b>	

**1er ESSAI**

	Dimensions théoriques			Dimensions relevés NMFP		Remarques
	Diamètre	Tolérance		Diamètre		
<b>Tiroir</b>	42	-0,02	-0,03	41,972	(20/03/2012)	Le jeu est trop réduit et les courbes le montrent avec un hystérésis trop grand, il faut agrandir les jeux
<i>Plan 753W82231 Rev. A</i>	46	-0,02	-0,03	45,978		
	34,4	-0,02	-0,03	34,38		
<b>Douille</b>	42H6	0	0,016	42,002	(28/03/2012)	
<i>Plan 754W99540 (P01)</i>	46H6	0	0,016	45,998		
<i>Plan 754W99572 (P01)</i>	34,4H6	0	0,016	34,402		
	Jeu mini	Jeu maxi	<b>Jeu moyen</b>	<b>Jeu</b>	<b>Delta avec jeu mini origine</b>	
	42	0,02	0,046	<b>0,033</b>	<b>0,03</b>	
	46	0,02	0,046	<b>0,033</b>	<b>0,02</b>	
	34,4	0,02	0,046	<b>0,033</b>	<b>0,022</b>	

**2ème ESSAI**

	Dimensions théoriques		Dimensions relevés NMFP	
	Diamètre	Tolérance	Diamètre	
<b>Tiroir</b>	42	-0,02	41,955	(19/06/2012)
<i>Croquis de P. IMBERDIS</i>	46	-0,02	45,96	
<i>Plan 753W82231 Rev. B</i>	34,4	-0,02	34,355	
<b>Douille</b>	42H6	0	42,002	(28/03/2012)
<i>Plan 754W99540 (P01)</i>	46H6	0	45,998	
<i>Plan 754W99572 (P01)</i>	34,4H6	0	34,402	
	Jeu mini	Jeu maxi	<b>Jeu moyen</b>	<b>Delta avec jeu moyen origine</b>
	42	0,02	0,046	<b>0,047</b>
	46	0,02	0,046	<b>0,038</b>
	34,4	0,02	0,046	<b>0,047</b>

**Définition Ajustement Douille/Tiroir**

	Dimensions théoriques			Remarques		
	Diamètre	Tolérance				
<b>Tiroir</b>	42	-0,02	-0,03	Dans le cadre des remises en état, il faut réaliser un relevé du tiroir monté afin de pouvoir réaliser le jeu moyen sur les nouvelles douilles avec surépaisseur mises en place.		
<i>Plan 753W82231 Rev. A</i>	46	-0,02	-0,03			
	34,4	-0,02	-0,03			
<b>Douille</b>	42	0,02	0,02			
<i>Plan 754W99540 (P02)</i>	46	0,02	0,02			
<i>Plan 754W99572 (P02)</i>	34,4	0,02	0,02			
	Jeu mini	Jeu maxi	<b>Jeu moyen</b>			
	42	<b>0,04</b>	<b>0,05</b>			<b>0,045</b>
	46	<b>0,04</b>	<b>0,05</b>			<b>0,045</b>
	34,4	<b>0,04</b>	<b>0,05</b>			<b>0,045</b>



## VIII. Liste des figures et des tableaux

Figure 1 : La centrale électrique .....	2
Figure 2 : Turbine à vapeur de 1300 MW.....	3
Figure 3 : Schéma de principe d'une turbine à vapeur, corps haute pression.....	4
Figure 4 : Schéma de base de la régulation de puissance et de vitesse du groupe turbo-alternateur .....	5
Figure 5 : CEH et leur environnement hydraulique .....	7
Figure 6 : Photo d'un CEH sur site .....	9
Figure 7 : Plan d'un convertisseur électrohydraulique .....	10
Figure 8 : Schéma fonctionnel du transducteur .....	11
Figure 9 : Schéma fonctionnel 1er et 2ème étage .....	12
Figure 10 : Schéma fonctionnel de l'étage manostatique .....	13
Figure 11 : Schéma fonctionnel de la boucle de position du tiroir de réglage du CEH .....	16
Figure 12 : Vue des capteurs dernière génération.....	17
Figure 13 : Réponse type d'un PID stable.....	18
Figure 14 : Réponse de la pression réglée et des soupapes de réglage sur petits échelons de consigne .....	21
Figure 15 : Réponse de la pression réglée et des soupapes de réglage sur grands échelons de consigne .....	22
Figure 16 : Critères PIS de la réponse en dynamique des soupapes de réglage sur échelon de consigne CEH.....	29
Figure 17 : Schéma du système .....	33
Figure 18 : Modélisation du système – Vue d'ensemble .....	36
Figure 19 : Schéma simplifié et modèle du bâti manostatique .....	37
Figure 20 : Schéma 2D de l'interface tiroir/douille .....	38
Figure 21 : Section de passage du fluide en fonction du recouvrement (Under lap) .....	39
Figure 22 : Modèle d'un pilote de servomoteur .....	40
Figure 23 : Vue 2D et modèle de la boîte à diaphragme.....	41
Figure 24 : Schéma logique et modèle de la carte RBP et du convertisseur position/intensité.....	42
Figure 25 : Vue 2D sortie 2 <sup>ème</sup> étage et modèle du transducteur/1 <sup>er</sup> étage et 2 <sup>ème</sup> étage.....	45
Figure 26 : $P'2 = f(I(\text{bobine}))$ - Courbe issue de la PFH .....	47
Figure 27 : Position tiroir = $f(P'2)$ - Courbe issue de la PFH .....	48
Figure 28 : Position tiroir = $f(P'2)$ - Courbe obtenue sur AMESIM.....	49
Figure 29 : $Pr = f(\text{position tiroir})$ - Courbe issue de la PFH .....	50
Figure 30 : $Pr = f(\text{position tiroir})$ - Courbe obtenue sur AMESIM.....	51
Figure 31 : $Pr = f(I(\text{bobine}))$ - Courbe issue de la PFH .....	52
Figure 32 : $Pr = f(I(\text{bobine}))$ - Courbe obtenue sur AMESIM.....	53
Figure 33 : Position tiroir = $f(\text{consigne})$ - Courbe obtenue sur AMESIM .....	54
Figure 34 : $Pr = f(\text{consigne})$ - Courbe issue d'un essai sur site.....	55
Figure 35 : $Pr = f(\text{consigne})$ - Courbe obtenue sur AMESIM.....	56
Figure 36 : $Pr = f(t)$ avec échelon de consigne .....	57
Figure 37 : $Pr = f(t)$ avec diaphragme de 4,5mm. Courbe obtenue sur AMESIM .....	59
Figure 38 : $Pr = f(t)$ avec lumière à 90°. Courbe obtenue sur AMESIM .....	60

Figure 39 : $P_r = f(t)$ avec $I = 2$ . Courbe obtenue sur AMESIM .....	61
Figure 40 : $P_r = f(t)$ avec $P = 0,5$ . Courbe obtenue sur AMESIM .....	62
Figure 41 : $P_1$ et course tiroir = $f(I \text{ (bobine)})$ .....	65
Figure 42 : $P_1$ et course tiroir = $f(I \text{ (bobine)})$ – Après usinage .....	66
Figure 43 : $P_1$ et course tiroir = $f(I \text{ (bobine)})$ .....	69
Figure 44 : $P_1$ et course tiroir = $f(P_2)$ .....	69
Figure 45 : $P_r = f(\text{course tiroir})$ .....	70
Figure 46 : Instabilité de la pression d'alimentation (50 bars) .....	70
Figure 47 : $P_r$ et course servomoteur = $f(\text{consigne})$ .....	71
Figure 48 : Pompage de l'ensemble des paramètres avec une pression 50bars instable .....	71
Figure 49 : Pompage de l'ensemble des paramètres avec petits échelons .....	72
Figure 50 : Pompage de l'ensemble des paramètres avec consigne en rampe lente .....	72

## **IX. Résumé – Summary**

### 1. Résumé

La campagne d'essais entreprise sur le site de CATTENOM 4 a permis de mettre en évidence que le phénomène de pompage de la pression réglée provenait de l'instabilité du couple régulateur électronique/CEH. Ce qui a pour conséquence de rendre instable tous le système bouclé. Celle entreprise sur le site de PENLY 2 a permis de mettre en évidence que les paramètres P et I du régulateur électronique influençaient directement le comportement du CEH et donc le phénomène de pompage de la pression réglée.

Ces investigations ont permis de cibler l'origine des pompages de la pression réglée. En effet, ces oscillations de pression proviennent d'une oscillation du tiroir de réglage du CEH.

La simulation numérique en cours a permis de valider les analyses décrites ci-dessus et donc d'identifier deux axes d'améliorations pour limiter les pompages :

- Partie électronique

Optimisation des réglages PID du régulateur électronique en coopération avec les services dédiés.

- Partie mécanique de l'étage manostatique

Etude des différentes interfaces mécaniques afin d'identifier l'origine des frottements excessifs. Une amélioration mécanique a déjà été étudiée et doit être mise en œuvre. D'autres pistes d'investigations sont en cours, comme l'étude de l'interface tiroir de réglage/douille manostatique ou l'étude d'un matériau de substitution au niveau des bagues de réparation.

*Mots clés : Régulation hydraulique turbine, convertisseur électrohydraulique, boucle de position, pompage, PID, instabilité, manostatique, simulation.*



## 2. Summary

The tests performed on site of CATTENOM 4 offered an opportunity to demonstrate that the phenomenon of pumping of the set point pressure results from the instability of the electronic regulator and EHC. The consequence is instability of the loop system. On the site of PENLY 2, we have clarified that the parameters P and I of the electronic regulator have influence on the test performed behaviour of the EHC, leading to the phenomenon of pumping of the set point pressure.

These investigations focused on the origin of the pumping of the set point pressure. Indeed, these oscillations of pressure result from an oscillation of the slide valve of EHC.

The numerical simulation on going allowed to validate the analyses described above and therefore to recommend two main directions for the improvement of the pumping phenomenon:

- Electronics element :

Optimization of the PID settings of the electronic regulator, in cooperation with electronic department.

- Mechanical pressure control element :

Study of the different mechanical interfaces to identify the origin of excessive rubbings. A mechanical improvement was already studied and will be implemented in the short term. Other investigations are under way, as the study of the interface between slide valve and pressure control sleeve or the study of a substitution material for the repair rings.

*Key words: turbine hydraulic control, electrohydraulic converter, position loop, pumping, PID, instability, control pressure, simulation.*

## **X. Glossaire**

- <sup>i</sup> EDF : L'entreprise Electricité De France
- <sup>ii</sup> Field service : Service d'ALSTOM qui gère tous les métiers chantier
- <sup>iii</sup> P.A.C. : Power Automation Control est une entité d'ALSTOM qui gère les systèmes de contrôle commande des centrales électrique
- <sup>iv</sup> CATTENOM : Centrale nucléaire française de 1300MW (Palier P'4)
- <sup>v</sup> GOLFECH : Centrale nucléaire française de 1300MW (Palier P'4)
- <sup>vi</sup> PENLY : Centrale nucléaire française de 1300MW (Palier P'4)
- <sup>vii</sup> GTA : Groupe turbo-alternateur
- <sup>viii</sup> Ilotage : En cas de surcharge (Grande demande du réseau), on fait tourner en circuit fermé la turbine afin de couper la relation entre le GTA et le réseau. On coupe l'arrivée vapeur, la vapeur en excès est dirigée vers les sous tirages pour alimenter la centrale.
- <sup>ix</sup> CEH : Convertisseur électrohydraulique
- <sup>x</sup> L.V.D.T : Linear Variable Differential Transformer
- <sup>xi</sup> RBP : Régulateur de la Boucle de Position
- <sup>xii</sup> PID. : Proportionnel Intégrale Dérivée
- <sup>xiii</sup> PIS : Paramètres Importants pour la Sureté. Ces critères sont définis par l'exploitant de la centrale dans le but de sécuriser les différentes machines. Ces critères doivent être respectés pour redémarrer l'exploitation de la machine.
- <sup>xiv</sup> PFH : Plateforme Hydraulique. Atelier d'essais hydrauliques ALSTOM situé sur le site de la Courneuve.
- <sup>xv</sup> Le gommage : C'est un phénomène de colmatage créé par la détérioration du fluide.
- <sup>xvi</sup> La nitruration : C'est un traitement de surface avec un apport en azote servant à améliorer la dureté en surface de la pièce permettant une dureté élevée et donc une diminution de l'usure dans le temps.