

# Régulation de débit niveau d'eau

## Manuel de comptes rendus de TP

➤ Système ERD 551

➤ Dans le domaine linéaire continu

Réf : ERD 551 000

Niveau	CITE 2011
Post secondaire	4
1 <sup>er</sup> cycle court	5

Logiciels sur PC

Reg551 (Réf: ERD 551 100)

En Option :

D\_Scil (Réf: ERD 551 800)

Scilab-Xcos & Compilateur

### Documents d'accompagnement

➤ Guide technique ERD 551 010

➤ Manuels de TP dans le domaine continu

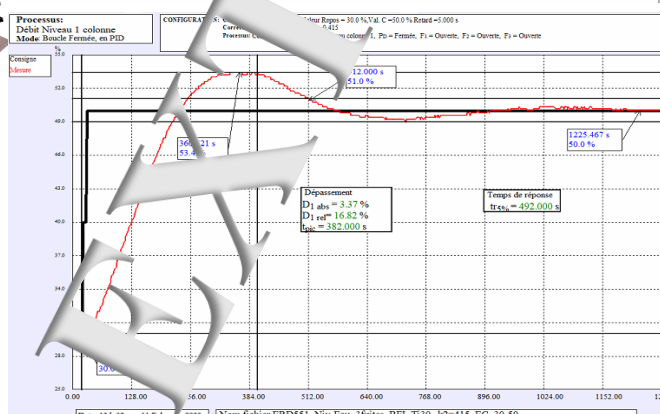
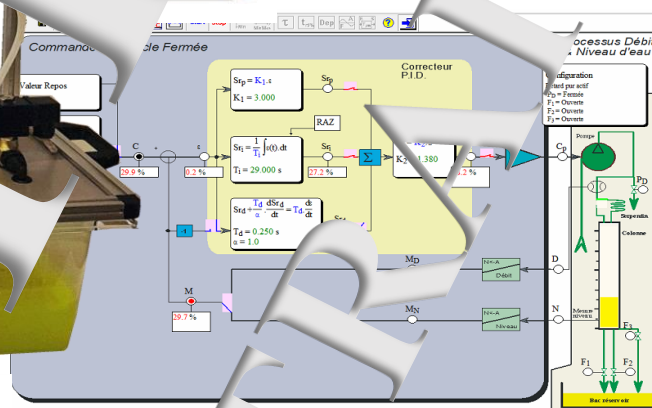
Manuel Sujets Réf: ERD 551 050

Manuel Comptes rendus Réf: ERD 551 060

➤ Manuels de TP dans le domaine échantillonné

Manuel Sujets Réf: ERD 551 070

Manuel Comptes rendus Réf: ERD 551 060



EXTRAITS  
EXTRAITS  
EXTRAITS

## SOMMAIRE:

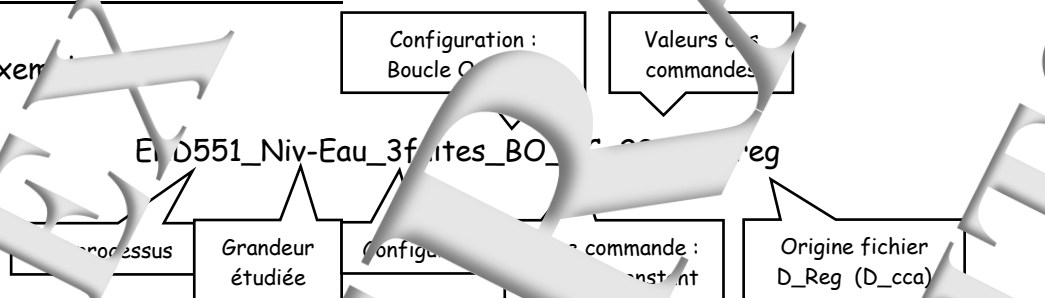
Référence	Thème	Page
TP1-BO	Etude système niveau d'eau en Boucle Ouverte (BO)	5
TP2-BFP	Etude Boucle Fermée (BF) correction Proportionnelle (P)	19
TP3-BFPI	Etude en BF avec correction P. + Intégrale (PI)	29
TP4-RT	Etude du système niveau d'eau avec retard pur	41
TP5-DE	Etude du système débit d'eau	57
TP6-C	Régulation cascade : Niveau d'eau et débit d'eau asservi	77

## Avertissement

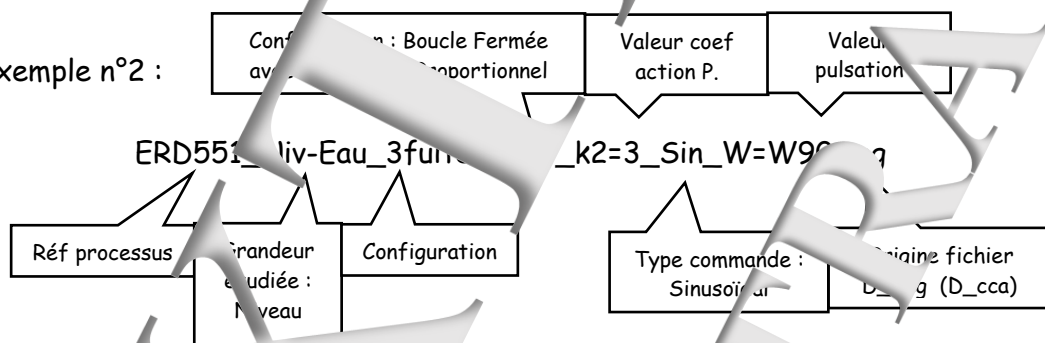
Les valeurs numériques déduites des essais expérimentaux sont fonction de la configuration (état des suites). La répétabilité d'une machine à l'autre n'est pas parfaite. Pour un même réglage initial, certains paramètres d'essais expérimentaux peuvent donc être légèrement différents.

## Dénomination des fichiers

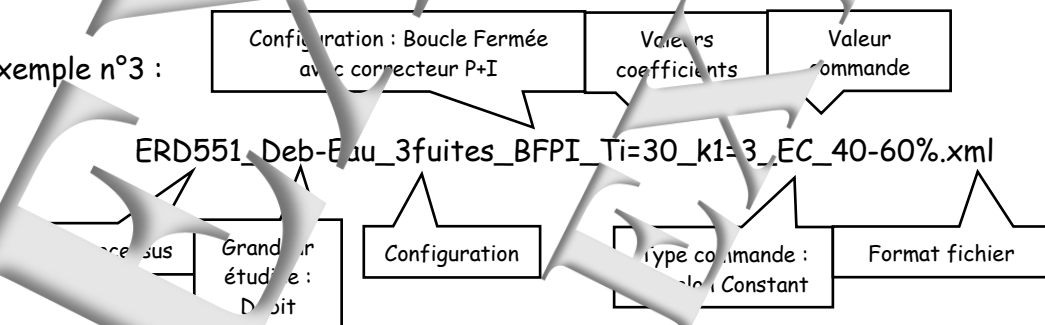
Exemple n°1 :



Exemple n°2 :



Exemple n°3 :



### **Ouvrage ressource**

**Automatique : régulations et asservissements**  
**Cours - Applications - Expérimentations - Prototypages**  
**(Coll. Automatique et productique)**

Auteurs : HANS Thierry, GUYÉNOT Pierre

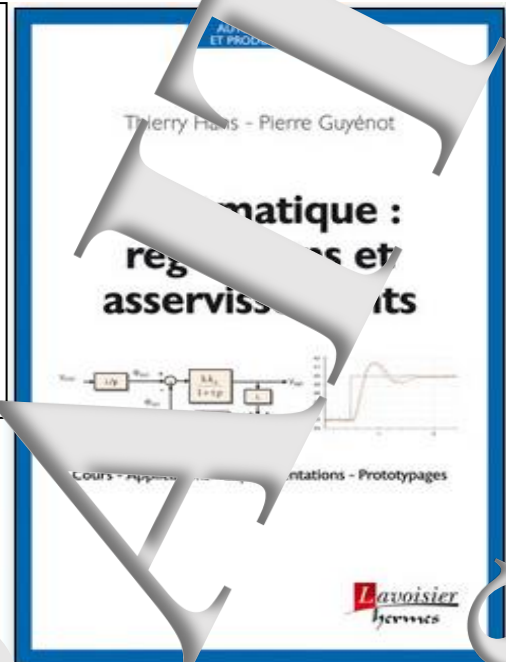
Langue : Français

Date de parution : 06-2014

Ouvrage 305 p. - 16.4x24 cm - Broché -

ISBN : 9782746246317

**Lavoisier**  
hermes



<p>Processus:</p> <p><b>Débit et niveau d'eau</b></p> <p><b>FRD 551</b></p> <p>Configuration:</p> <p><b>Régulation de niveau d'eau</b></p>
<p><b>COMPTES RENDUS d'essai N°6</b></p> <p><i>Régulation cascade</i></p>

Niveau :	CITE 2011
Post secondaire	4
Supérieur cycle court	5

## SOMMAIRE:

<b>1 - TP n°6.1 Etude de la boucle interne fermée</b>	<b>3</b>
1.1 Etude en régime statique	3
1.2 Réponse à un échelon constant	4
1.3 Comportement en régime harmonique	5
1.4 Réponse à un échelon de vitesse	5
1.5 Validation du modèle par simulation et comparaison	6
<b>2 - TP n°6.2 Etude de la boucle externe ouverte</b>	<b>7</b>
2.1 Prédéterminations	7
2.2 Etude en régime statique	8
2.3 Réponse à un échelon constant	9
2.4 Comportement en régime harmonique	10
2.5 Validation du modèle par simulation et comparaison	11
<b>3 - TP n°6.3 Etude boucle externe fermée en P.I.</b>	<b>12</b>
3.1 Prédéterminations	12
3.2 Etude en régime statique	12
3.3 Réponse à un échelon constant	13
3.4 Comportement en régime harmonique	14
3.5 Validation du modèle par simulation et comparaison	15
3.6 Influence du coefficient d'action P.I.	16
<b>4 - TP n°6.4 Etude boucle externe fermée en P.I.</b>	<b>16</b>
4.1 Prédéterminations	16
4.2 Etude en régime statique	17
4.3 Réponse à un échelon constant	17
4.4 Etude en régime harmonique	18
4.5 Réponse à un échelon de vitesse (rampe)	19
4.6 Validation du modèle par simulation et comparaison	19
4.7 Influence du coefficient d'action P.I.	20



EXTRAITS  
EXTRAITS  
EXTRAITS

# 1 - TP N°6.1 ETUDE DE LA BOUCLE INTERNE FERMEE

## 1.1 Etude en régime statique

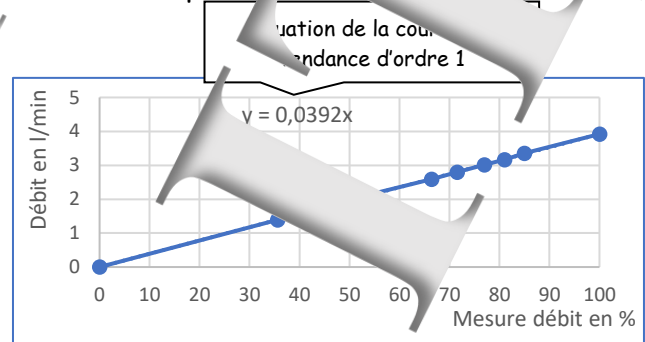
### 1.1.1 Expérimentations

Tableau de mesure :

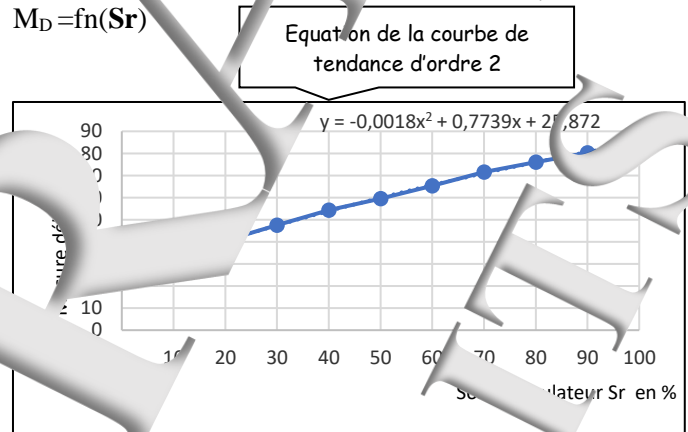
$C_D = Sr_1$ en %	$M_D$ en %	$D$ en l/min
5	30	
10	10	1,29
20	40,6	1,6
30	47,5	1,86
40	54,3	
50	62,5	2,33
60	65,4	2,6
70	71,6	2,8
80	76,5	2,97
90	80,2	3,14
100	85	3,33

Cette caractéristique n'est pas linéaire (du point de vue des asservissement) car elle est de la forme  $y = a.x$ .

Caractéristique de transfert pour :  $M_D = f_n(D)$



Caractéristique de transfert statique processus:  $M_D = f_n(Sr)$



### 1.1.2 Exploitation

→ La caractéristique du capteur permet de définir le coefficient de transfert :

$$K = \frac{M_D}{D} = \frac{1}{0,0392} = 25,5 \text{ \% / l/min}$$

→ L'équation de la courbe de tendance, de type polynômiale, donnée par le logiciel "Excel", la plus proche de la courbe réelle, est d'ordre 2.

→ La valeur de  $M_D$ , notée «  $M_{D0}$  » obtenue si  $Sr = 40$ .

$$M_{D0} = -0,0018(Sr_0)^2 + 0,774.Sr_0 + 25,9 = 54\%$$

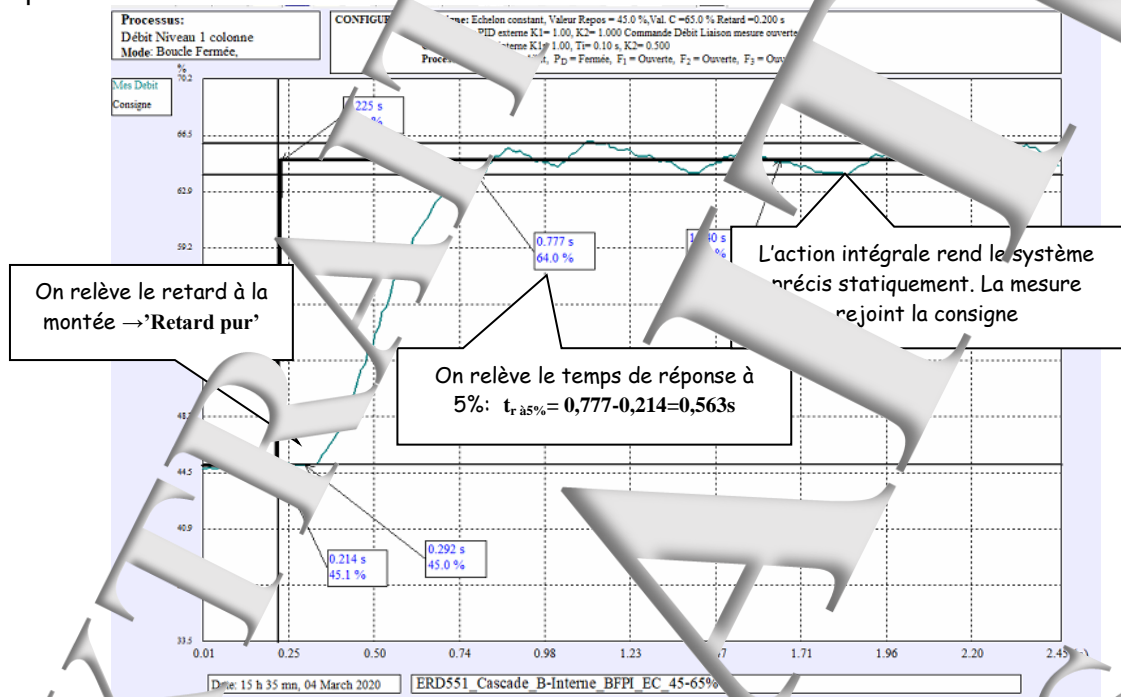
→ Coefficient statique au point de repos :  $\frac{M_{D0}}{Sr_0} = 1,35$

→ Coefficient de transfert, en variations, autour du point de repos, est déduit de la dérivation de l'équation de tendance au point de repos:

$$\Delta Sr = -2 \times 0,0018.Sr + 0,774 \quad \text{En } Sr_0 = 40\% \rightarrow G_{v0} = \frac{\Delta M_N}{\Delta S_r} = 0,63$$

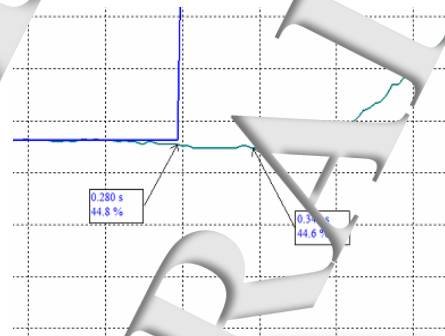
## 1.2 Réponse à un échelon constant

### 1.2.1 Expérimentation



### 1.2.2 Exploitation

- Détermination du coefficient de transfert statique :  $F_{D0-} = 1$  Après :  $F_{D+} = \frac{M_D}{C+} = 1$
- Détermination du coefficient de transfert en variation :  $K_{FDv0} = \frac{\Delta M_D}{\Delta S_r} = 1$
- On constate qu'au début de la montée, la mesure est nulle, ce qui prouve que le système est d'ordre supérieur à 1.
- On constate qu'au départ le signal n'évolue qu'au bout d'un certain temps, ce qui prouve la présence d'un retard pur. On peut évaluer ce retard pur :  
 $Tr = 0,345 - 0,280 = 0,065s$
- L'allure générale de la réponse est caractéristique d'un second ordre, ce qui montre que le modèle est du deuxième ordre, pas forcément décomposable.  
Le coefficient d'amortissement est probablement voisin de 1
- On relève le temps de réponse à 5% :  $t_{r\ 5\%} = 0,56s$   
Si on admet un coefficient d'amortissement égal à 0,7, on peut en déduire une valeur approchée de la pulsation propre :  $65 = 0,5 = 3/\omega_D \rightarrow \omega_D = 3/0,5 \rightarrow \omega_D \approx 6 \text{ rad/s}$



Ce qui devrait être modélisé sous la forme de « Bronda » d'ordre 2 non décomposable:

$$F_D = \frac{e^{-Tr \cdot p}}{1 + \frac{2 \cdot \xi_D}{\omega_D} p + \frac{1}{\omega_D^2} p^2} \quad \text{avec : } Tr = 0,065s ; \xi_D \approx 0,7 \text{ rad/s}$$

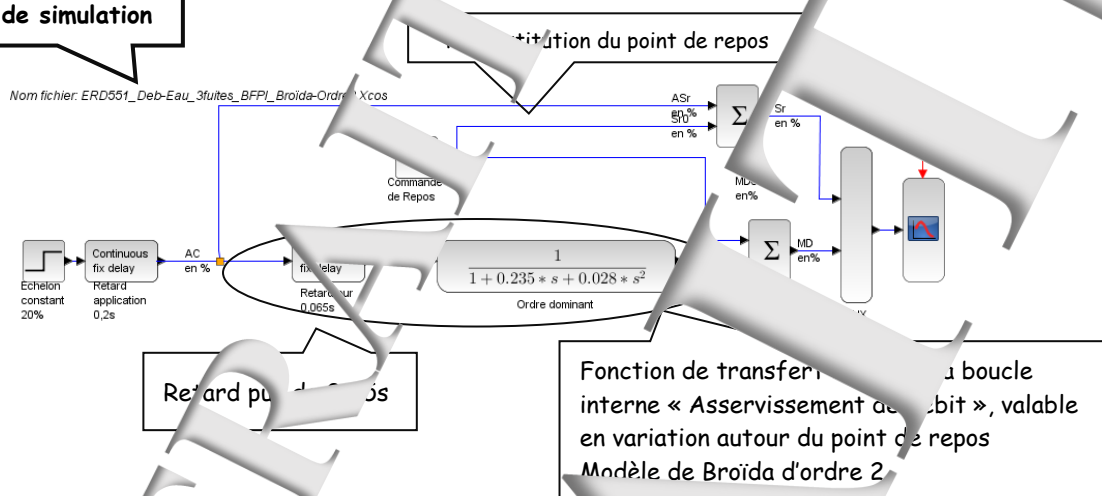




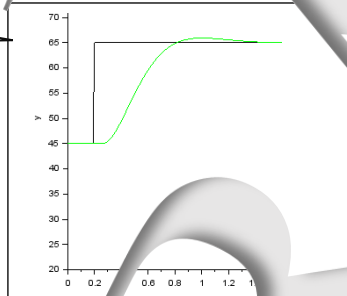
## 1.5 Validation du modèle par simulation et comparaison

### 1.5.1 Simulation sous « Scilab-Xcos »

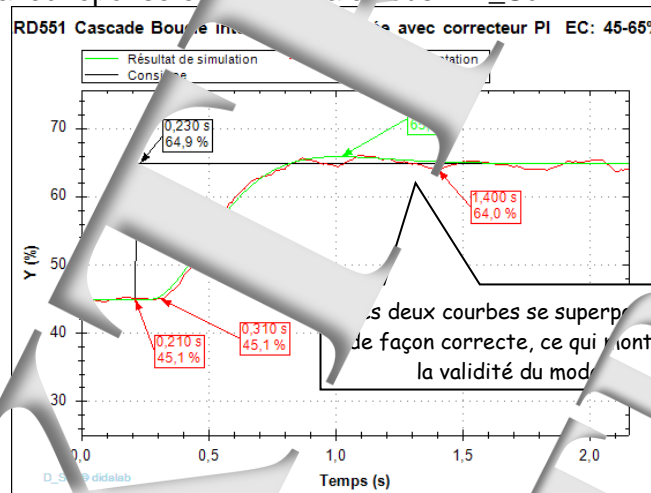
#### Schéma de simulation



#### Résultat de simulation



### 1.5.2 Comparaison avec réponse expérimentale sous « D\_Scil »



→ Soit le modèle en régime dynamique (variation autour du point de repos) Modèle de Broïda d'ordre 2 non décomposable :

$$\Delta C = \Delta S_r(p) \rightarrow \Delta D(p) = \frac{e^{-0.065p}}{(1 + 0.235p + 0.028p^2)} \rightarrow \Delta M_D \text{ en \%}$$

Soit les paramètres, écriture sous forme colonique) :

$$K_{FDV0}=1; \tau=0.065s; \xi_D=0.7 \text{ et } \omega_D=5.77 \text{ rad/s}$$

## 2 - TP N°6.2 ETUDE EN BOUCLE EXTERNE OUVERTE

### 2.1 Prédéterminations

#### 2.1.1 Analyse du processus en régime statique

D'après l'hypothèse énoncée, le débit de fuite (Débit de sortie) a pour expression :

$$D_s = \alpha \cdot \sqrt{H} = \alpha \cdot (H)^{1/2}$$

→ La particularité du régime statique, c'est que les grandeurs sont constantes, donc n'évoluent pas au cours du temps. Dans ce régime, le débit de sortie est donc égal au débit d'arrivée débité par la pompe :

$$D_e = D_s = \alpha \cdot \sqrt{H} \rightarrow D_e^2 = \alpha^2 \cdot H$$

Si on note  $\mu_N$  le coefficient de transfert du capteur de niveau :

$$\mu_N = \frac{M_N}{H} \quad \text{en } \frac{\text{cm}}{\text{cm}} \rightarrow H = \frac{M_N}{\mu_N}$$

Si on note  $\mu_D$  le coefficient de transfert du capteur de débit :

$$\mu_D = \frac{M_D}{D} \quad \text{en } \frac{\text{cm}}{\text{cm}^3/\text{s}} \rightarrow D_e = \frac{M_D}{\mu_D} \quad \text{Si on remplace dans l'expression ci-dessus} \rightarrow \left(\frac{M_D}{\mu_D}\right)^2 = \alpha^2 \cdot \frac{M_N}{\mu_N}$$

Si la correction de l'asservissement de débit est de 1, la consigne en régime permanent est :

$$M_N = \frac{\mu_N}{\alpha^2 \cdot \mu_D^2} C_D \rightarrow \text{de la forme } y = a \cdot x^2$$

#### 2.1.2 Analyse du processus en régime dynamique

→ Le débit d'entrée contribue à l'élévation du niveau du réservoir et au débit de sortie :

$$D_e(t) = \Phi \cdot \frac{dh}{dt} + D_s(t) \rightarrow D_0 + \Delta D_e(t) = \Phi \cdot \frac{dh}{dt} + D_0 + \Delta D_s(t) \rightarrow e(t) = \Phi \left( \frac{dh}{dt} \right) + s(t)$$

→ On exprime l'expression du débit de sortie à l'aide de l'équation aux dérivées partielles :

$$D_s(t) = D_0 + \frac{\partial D_s}{\partial H(\text{en } H_0)} (h(t) - H_0) = D_0 + \frac{\alpha}{2 \cdot \sqrt{H_0}} y(t) = D_0 + \frac{\alpha}{2 \cdot \sqrt{H_0}} y(t) \rightarrow e(t) = \Phi \left( \frac{dh}{dt} \right) + \frac{\alpha}{2 \cdot \sqrt{H_0}} y(t)$$

Si on remplace  $\alpha$  par son expression :  $e(t) = \Phi \left( \frac{dh}{dt} \right) + \frac{D_0}{2 \cdot H_0} y(t)$

→ Après application de la transformée de LAPLACE :  $\Delta D_{e(p)} = \Phi \cdot p \cdot \Delta H(p) + \frac{D_0}{2 \cdot H_0} \Delta H(p)$

$$\text{Or } \Delta D_e = \frac{\Delta M_D}{\mu_D} \quad \text{et } \Delta H = \frac{\Delta M_N}{\mu_N} \rightarrow \frac{\Delta C}{\mu_D} = \frac{\Phi}{\mu_N} p \cdot \Delta M_{N(p)} + \frac{D_0}{2 \cdot H_0 \cdot \mu_N} \Delta M_{N(p)}$$

→ Soit la fonction de transfert en valeur pour d'un point de repos :

$$\frac{\Delta M_{N(p)}}{\Delta C(p)} = \frac{\frac{N}{2}}{p \cdot \frac{D_0}{H_0}} \rightarrow \frac{\Delta M_{N(p)}}{\Delta C(p)} = \frac{\frac{N \cdot 2 \cdot H_0}{\mu_D \cdot D_0}}{1 + \frac{2 \cdot \Phi \cdot H_0}{D_0} p} \rightarrow G_{v0} = \frac{2 \cdot H_0}{\mu_D} \quad \text{et} \quad \tau = \frac{2 \cdot \Phi \cdot H_0}{D_0}$$

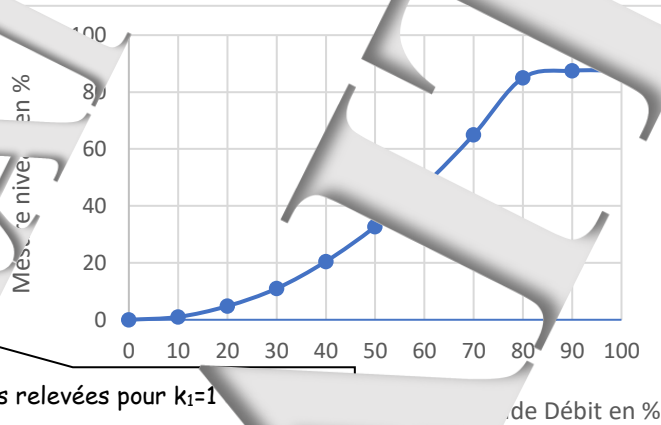
## 2.2 Etude en régime statique

### 2.2.1 Caractéristique de transfert statique

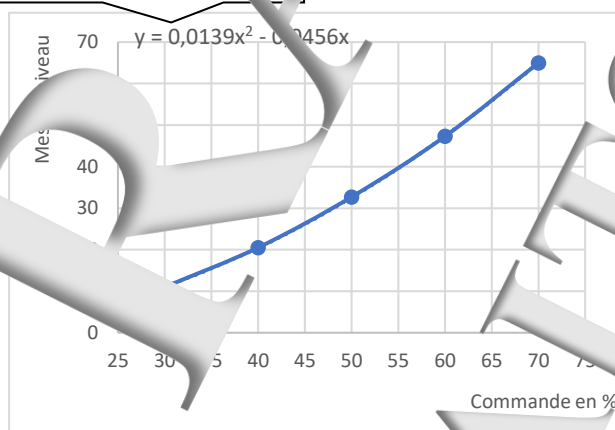
Tableau de mesure

C en %	M en %
0	0
10	1
20	4,8
30	11
40	20,5
50	32,7
60	47,3
70	65
80	85
90	87,5
100	87,5

Caractéristique de transfert statique :  $M=f_n(C)$



Equation de la courbe de tendance



Caractéristique statique au voisinage du point de repos

### 2.2.2 Exploitation

→ La caractéristique de transfert statique n'est pas linéaire car elle n'est pas de la forme  $y = a \cdot x$ . Le logiciel 'Excel' donne l'équation de la courbe de tendance d'ordre 2 :

$$M = 0,0139 \cdot C^2 - 0,0456 \cdot C$$

→ La valeur de la consigne de repos qui permet d'avoir une mesure proportionnelle à 10% est:  $C_0 = 55\% \rightarrow M_0 = 39,54\%$

→ Coefficient de transfert statique en  $C_0$ :  $G_0 = \frac{M_0}{C_0} = \frac{39,54}{55} = 0,72$

→ Coefficient de transfert statique au point de repos de  $C_0$  se détermine par la dérivée de l'équation de la courbe de tendance en  $C_0$ :  $C_0 = 55\% \rightarrow G_{v0} = \frac{dM}{dC} = 1,53$

#### Vérification :

→ On vérifie que la caractéristique est bien de la forme  $y = a \cdot x^2 - b \cdot x$  en  $C_0 = 55\%$

$$0,0139 \cdot C^2 = 42 \text{ et } 0,0456 \cdot C = 2,5 \rightarrow M = 0,0139 \cdot C^2 - 0,0456 \cdot C$$

D'après l'expression théorique obtenue en partie 2.1 :  $M_N = \frac{\mu_N}{\alpha^2 \cdot \mu_D^2} \cdot C^2 \rightarrow \frac{\mu_N}{\alpha^2 \cdot \mu_D^2} = 0,0139$

On a  $\mu_N = 2\%$  et  $\mu_D = 2\%$  /l/min  $\alpha = 0,47$  avec H en cm et D en l/min

On vérifie que l'expression théorique obtenue en partie 2.1 est :  $G_{v0} = \frac{2 \cdot \mu_N}{\mu_D \cdot D} \rightarrow G_{v0} = \frac{2 \cdot M_0}{C_0} = 1,44 \rightarrow \# \text{ OK}$

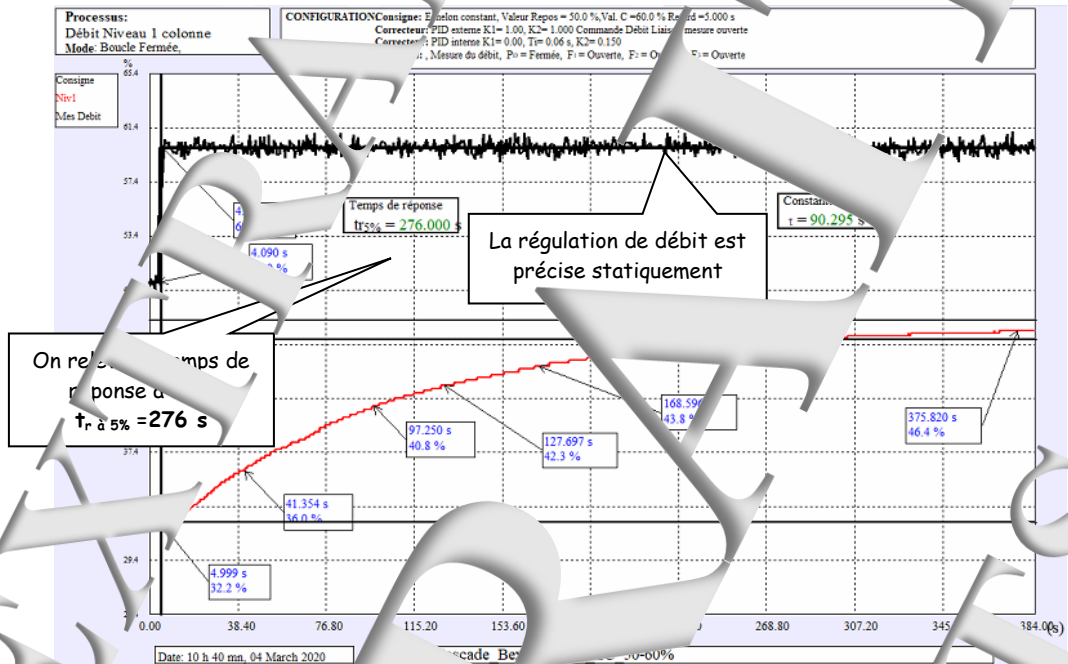


## 2.3 Réponse à un échelon constant

### 2.3.1 Expérimentation

Si on souhaite un échelon de consigne en variation de  $\pm 10\%$  pour du point de repos de la mesure  $M_{D0} = 55\%$ , l'échelon constant passera de  $C = 55\%$  à  $C = 60\%$

Relevé expérimental :



### 2.3.2 Exploitation :

→ Vérification du coefficient de transfert statique :

$$G_0 = \frac{M_0}{C} = \frac{46,4 - 32,2}{2 \times 55} \quad \text{Conforme à la valeur précédemment obtenue}$$

→ Vérification du coefficient de transfert en variation :

$$G_{vo} = \frac{\Delta M}{\Delta C} = \frac{46,4 - 32,2}{60 - 50} \quad G_{vo} = \dots \quad \text{Conforme à la valeur précédemment obtenue}$$

→ On relève la constante de temps dominante  $\tau = 90s$

→ On relève le temps de réponse à 5% :  $t_{r,5\%} = 276s \rightarrow t_{r,5\%} \approx 3\tau$

Ce rapport entre temps de réponse et constante de temps prouve que l'on est en présence d'un système du premier ordre dominant.

En première approximation, on pourra donc admettre :

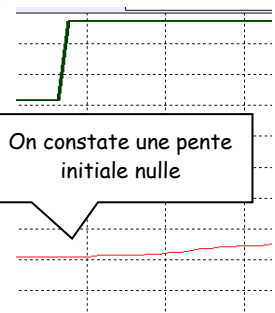
$$G(p) \approx \frac{G_{vo}}{1 + \tau_1 p} \quad \tau_1 = 90,42 \text{ et } \tau_{O1} = 90s$$

→ En fait, un zoom au début de la montée montre que la pente initiale est nulle, ce qui prouverait que le système est d'ordre supérieur à 1.

On modèle plus fidèle serait :

$$G(p) = \frac{G_{vo}}{(1 + \tau_{O1} p)(1 + \tau_{O2} p)}$$

Avec  $\tau_{O2}$  constante de temps non dominante  $\tau_{O2} \ll \tau_{O1}$

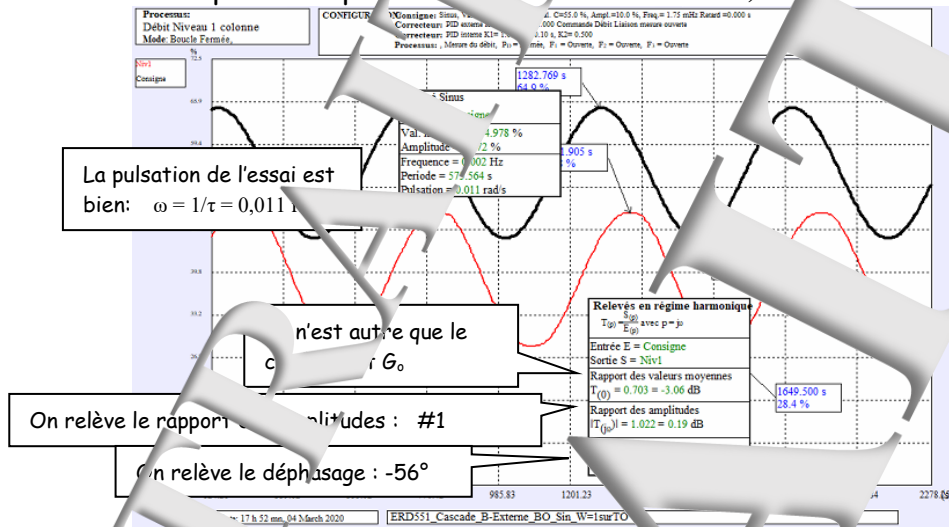




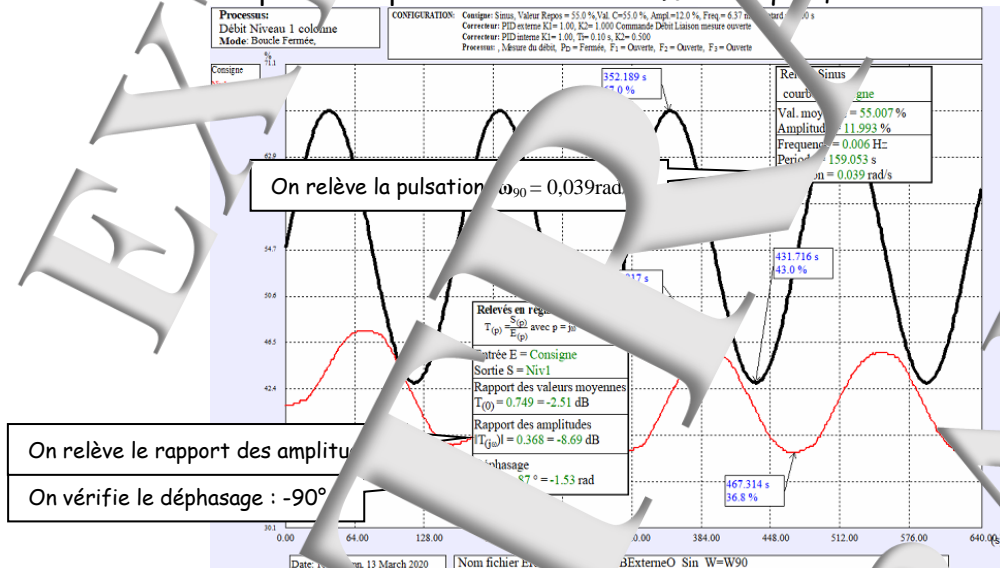
## 2.4 Comportement en régime harmonique

### 2.4.1 Expérimentations

**Essai n°1** A la pulsation particulière :  $\omega = 1/\tau = 1/90 = 0,011 \text{ rad/s}$



**Essai n°2** A la pulsation particulière :  $\omega = \omega_{90}$  telle que  $\phi = 90^\circ$



### 2.4.2 Exploitations

#### De l'essai n°1

→ Vérification du rapport des amplitudes

Si on admet un modèle du premier ordre, à la pulsation particulière  $\omega = 1/\tau$ , l'atténuation doit être de  $\sqrt{2}$  soit le rapport des amplitudes  $\frac{1,42}{1,414} \approx 1$  c'est bien ce qu'on relève.

→ Vérification du déphasage

Si on admet un modèle du premier ordre, à la pulsation particulière  $\omega = 1/\tau$ , le déphasage doit être égal à  $-45^\circ$ . Or on relève  $-56^\circ$ . C'est dû à la constante de temps non dominante qui a de l'influence.

Si on considère que le surplus de déphasage ( $56 - 45 = 11^\circ$ ) est dû à une constante non dominante notée  $\tau_{02}$

On peut en déduire une estimation :  $\text{Atan}(\tau_{02} \cdot \omega) \text{ en } ^\circ = 10 \rightarrow \tau_{02} = \frac{-\text{Atan}(\tau_{02} \cdot \omega)}{\omega} = \frac{-\text{Atan}(10 \cdot 0,011)}{0,011} \rightarrow \tau_{02} \approx 16 \text{ s}$

#### De l'essai n°2

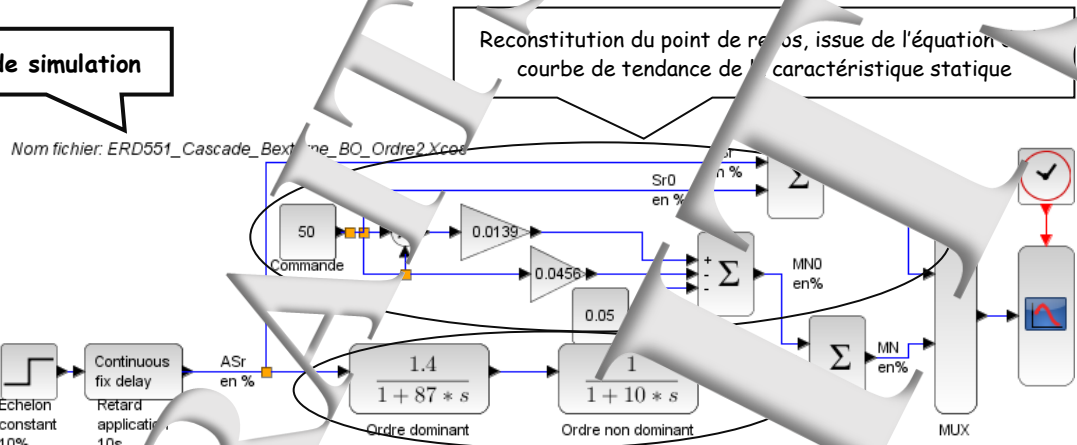
→ la pulsation  $\omega_{90}$  permet d'évaluer la constante de temps non dominante :  $\tau_{02} = \frac{1}{\tau_{01} \cdot (\omega_{90})^2} = 7,3 \text{ s}$

→ les amplitudes, permet d'évaluer le coefficient d'amortissement :  $G_{v\omega_{90}} = \frac{G_{v0}}{2 \cdot \xi_0} \rightarrow \xi_0 = 1,93$

## 2.5 Validation du modèle par simulation et comparaison

### 2.5.1 Simulation sous « Scilab-Xcos »

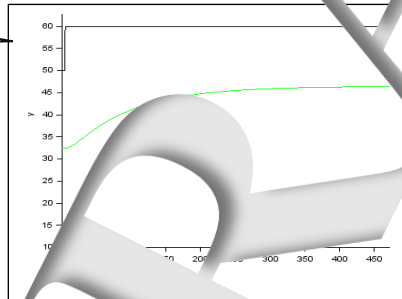
#### Schéma de simulation



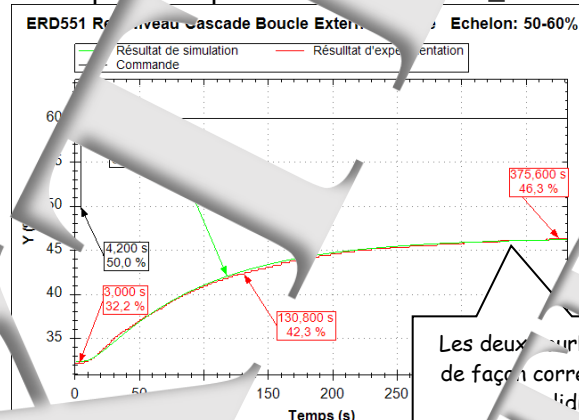
Retard d'établissement de la commande

Fonction de transfert en

#### Résultat de simulation



### 2.5.2 Comparaison avec réponse expérimentale « D\_Scil »



→ Soit le comportement en régime dynamique (en variation autour du point de repos), modèle d'ordre 2 décomposable avec constante de temps très dominante :

$$\Delta C = \Delta S r_{2(p)} \text{ en \%}$$

$$Fv_{D(p)} = \frac{1}{(1 + 87 \cdot p)(1 + 10 \cdot p)}$$

$$\Delta M_N \text{ en \%}$$

soit les paramètres du modèle décomposé :  $G_{v0}=1,4$  ;  $\tau_{01} = 87s$  et  $\tau_{02} = 10s$

ceux du modèle non décomposé (forme canonique) :  $\omega_{n0} = 0,034 \text{ rad/s}$  et  $\xi_0 = 1,64$

### 3 - TP N°6.3 ETUDE BOUCLE EXTERNE FERMEE EN P.

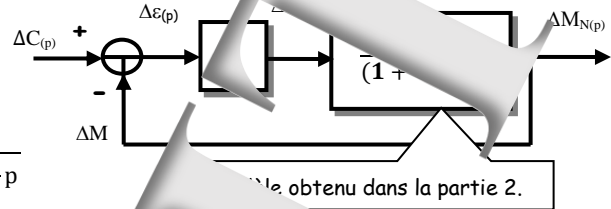
#### 3.1 Prédéterminations

Si on admet un modèle du premier ordre en BO :

→ Le schéma blocs en BF et en variation :

→ Fonction de transfert en BF :

$$F_v(p) = \frac{\Delta M_N(p)}{\Delta C(p)} = \frac{k \cdot G_{v0}}{1 + \tau_{10} \cdot p + k \cdot G_{v0}} \cdot \frac{\frac{k \cdot G_{v0}}{1 + \tau_{10} \cdot p + k \cdot G_{v0}}}{1 + \frac{\tau_{10}}{1 + k \cdot G_{v0}} p}$$



Le système en BF reste du premier ordre :

→ Gain statique :

$$\frac{k \cdot G_{v0}}{1 + k \cdot G_{v0}}$$

→ Constante de temps :  $\tau_{F1} = \frac{\tau_{10}}{1 + k \cdot G_{v0}}$

Si on souhaite que le système soit 4 fois plus rapide en BF qu'en BO, cela entraîne la relation :

$$k \cdot G_{v0} = 4 \rightarrow k = \frac{3}{G_{v0}} = \frac{3}{1.4} \rightarrow k = 2,14$$

→ La constante de temps dominante vaudra :  $\tau_{F1} = \frac{\tau_{10}}{4}$

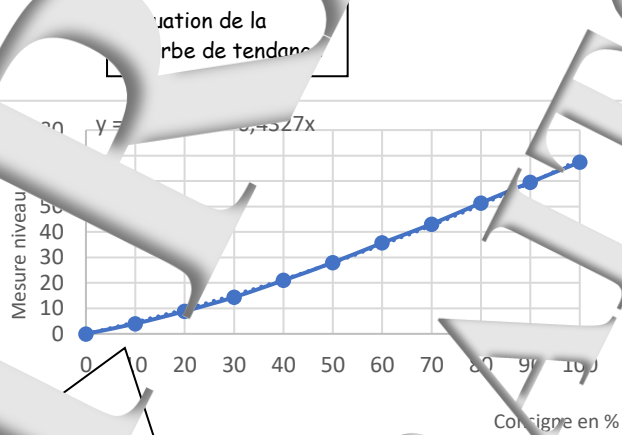
→ Le coefficient de transfert en variation vaudra :  $K_{FV} = \frac{1}{1 + \frac{1}{k \cdot G_{v0}}} = \frac{4}{5} = 0,75$

→ Le coefficient de transfert statique :  $K_{F0} = \frac{k \cdot G_{v0}}{1 + k \cdot G_{v0}} = \frac{14 \cdot 0,72}{1 + 14 \cdot 0,72} \rightarrow K_{F0} = 0,6$

#### 3.2 Etude du système statique

##### 3.2.1 Expérimentation

C en %	M_N en %
0	0
10	4
20	8,9
30	14,4
40	21
50	28
60	35,7
70	43,1
80	51,4
90	59,5
100	67,4



Même si la courbe n'est pas linéaire, elle l'est plus qu'en BO. Le bouclage améliore la linéarité.

##### 3.2.2 Exploitation

→ La caractéristique de la courbe n'est pas linéaire car elle n'est pas de la forme  $y = a \cdot x$

Le logiciel 'Excel' a trouvé la courbe de tendance d'ordre 2 :

$$M = 0,0025 \cdot C^2 + 0,435 \cdot C$$

→ La valeur de la consigne de repos qui permet d'avoir une mesure de  $M_0 = 40\%$  est :  $C_0 = 66,7\%$

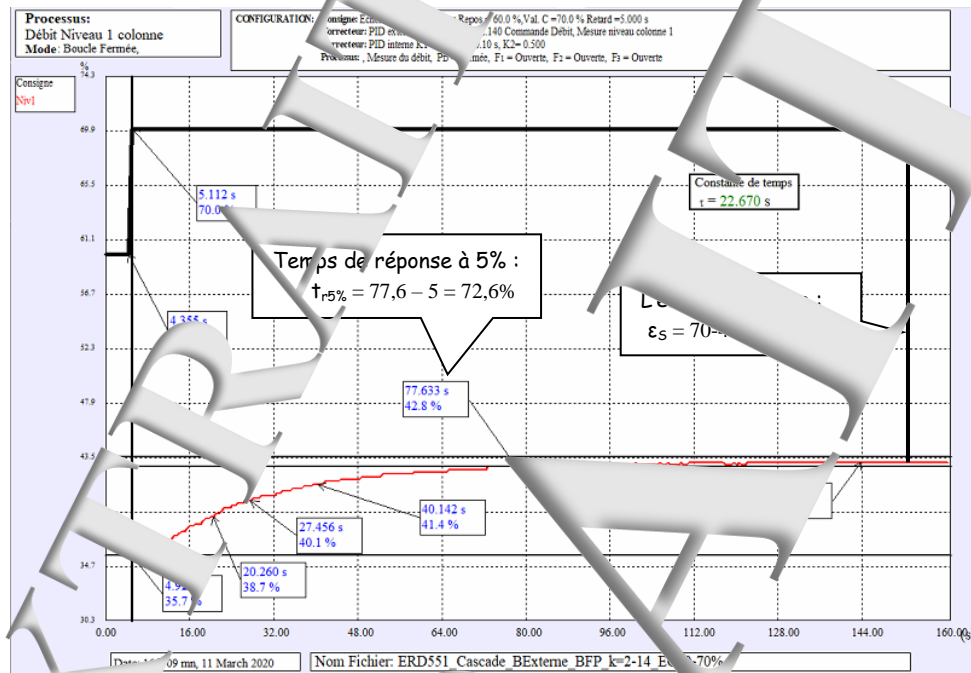
→ Coefficient de transfert statique en  $C_0$  :  $K_{F0} = \frac{M_0}{C_0} = \frac{40}{66,7} = 0,6$  (Vérifie le résultat du 3.1)

→ Coefficient de transfert en variation autour de  $C_0$  se détermine par la dérivée de l'équation de la courbe de tendance :

$$2 \cdot 0,0025 \cdot C_0 + 0,435 \text{ en } C_0 = 66,7\% \quad K_{FV0} = \frac{\Delta M}{\Delta C} = 0,75 \quad (\text{Vérifie le résultat du 3.1})$$

### 3.3 Réponse à un échelon constant

#### 3.3.1 Expérimentation



#### 3.3.2 Exploitation

→ Vérification du coefficient de transfert statique (valeurs moyennes) :

$$K_{F0} = \frac{43,1 + 35,7}{2 \times 65} = 0,6 \text{ à comparer à } 0,6 \text{ c'est O.K.}$$

→ Vérification du coefficient de transfert en variation :

$$K_{FV} = \frac{\Delta M_N}{\Delta C} = \frac{43,1 - 35,7}{70 - 60} = 0,74 \text{ à comparer à } 0,75 \text{ c'est O.K.}$$

→ Vérification de la constante de temps dominante :

On relève  $\tau_{F1} = 22,7s$  à comparer à  $22,5$  c'est O.K.

→ On relève le temps de réponse à 5% :  $t_{r\text{à}5\%} = 77,6 - 5 = 72,6s \rightarrow t_{r\text{à}5\%} > 3 \times \tau$

Ce rapport de 3 entre temps de réponse et constante de temps montre qu'il y a en présence d'un système du premier ordre.

En première approximation, on peut admettre :

$$F_V(p) \cong \frac{K_{FV}}{1 + \tau_{F1} \cdot p} \text{ Avec : } K_{FV} = 0,74 \text{ et } \tau_{F1} = 22,7s$$

On vérifie qu'un bouclage avec action proportionnelle ne modifie pas la forme d'écriture de la fonction de transfert. Il ne modifie que les valeurs des coefficients.

→ En réalité, un zoom au début de la montée montre que la pente initiale est nulle, ce qui prouverait que le système est d'ordre supérieur à 1.

On modélise plus finement :

$$F_V(p) = \frac{K_{FV}}{(1 + \tau_{F1} \cdot p)(1 + \tau_{F2} \cdot p)}$$

Avec  $\tau_{F2}$  constante de temps non dominante  $\tau_{F2} \ll \tau_{F1}$

Le bouclage fait que le rapport est moins grand en BF

Si on augmente le coefficient  $k$ , elles se rapprochent de plus en plus pour devenir égales, puis même complexes conjuguées<sup>1</sup>. Cette évolution est démontrée par les « lieux d'Evans » du système.

On constate une pente initiale nulle

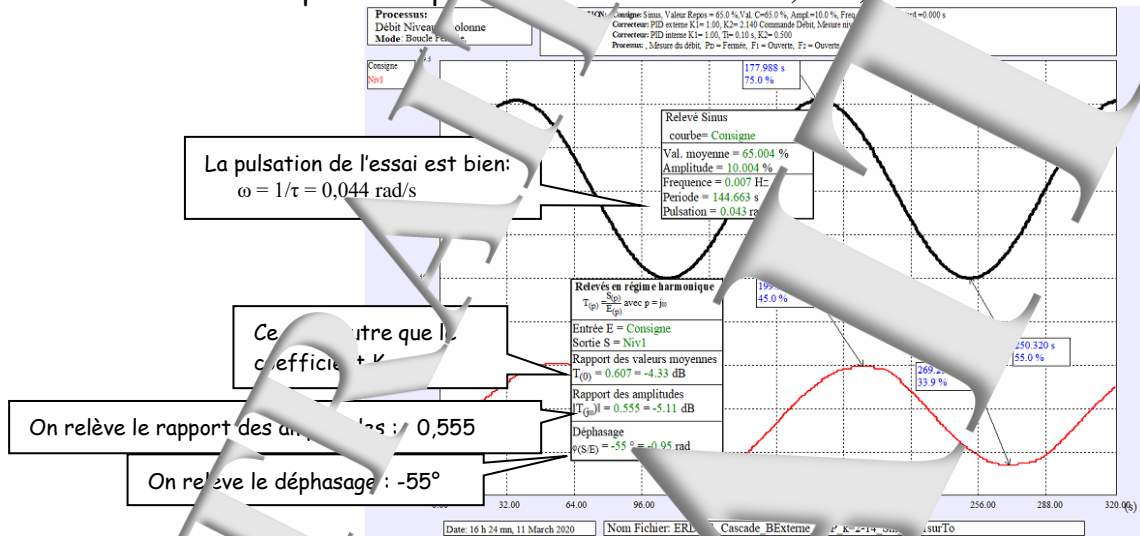
<sup>1</sup> D'après ouvrage « Régulation automatique : régulations et asservissements » T. HANS Editions Lavoisier Chapitre 8 « Lieux d'Evans »



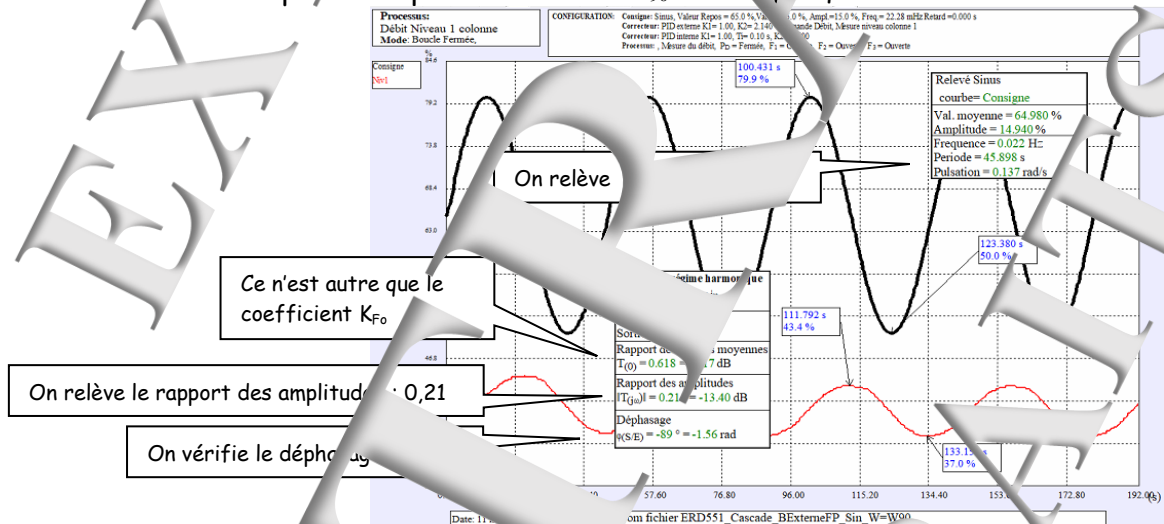
### 3.4 Comportement en régime harmonique

#### 3.4.1 Expérimentations

**Essai n°1** : A la pulsation particulière  $\omega = 1/\tau = 1/22,5 = 0,044 \text{ rad/s}$



**Essai n°2** : A la pulsation particulière  $\omega = \omega_{90}$  telle que  $\varphi = -90^\circ$



#### 3.4.2 Exploitations

##### De l'essai n°1

→ Vérification du rapport des amplitudes

Si on admet un modèle du premier ordre, à la pulsation particulière  $\omega = 1/\tau$ , l'atténuation doit être de  $1/\sqrt{2}$  soit le rapport des amplitudes  $\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{0,75}{1,414} \approx 0,53$  c'est bien ce qu'on relève.

→ Vérification

Si on admet un modèle du premier ordre, à la pulsation particulière  $\omega = 1/\tau$ , le déphasage doit être égal à  $-45^\circ$ . Or on relève  $-55^\circ$ . C'est dû à la constante de temps non dominante qui a de l'influence.

Si on considère que le surplus de déphasage ( $10^\circ$ ) est dû à une constante de temps non dominante notée  $\tau_{F2}$

On peut en déduire une estimation :  $\text{Atan}(\tau_{F2} \cdot \omega) \text{ en } ^\circ = 10^\circ \rightarrow \tau_{F2} = \frac{\text{tg}(10^\circ \cdot \frac{180}{\pi})}{0,044} \rightarrow \tau_{F2} \approx 4 \text{ s}$

##### De l'essai n°2

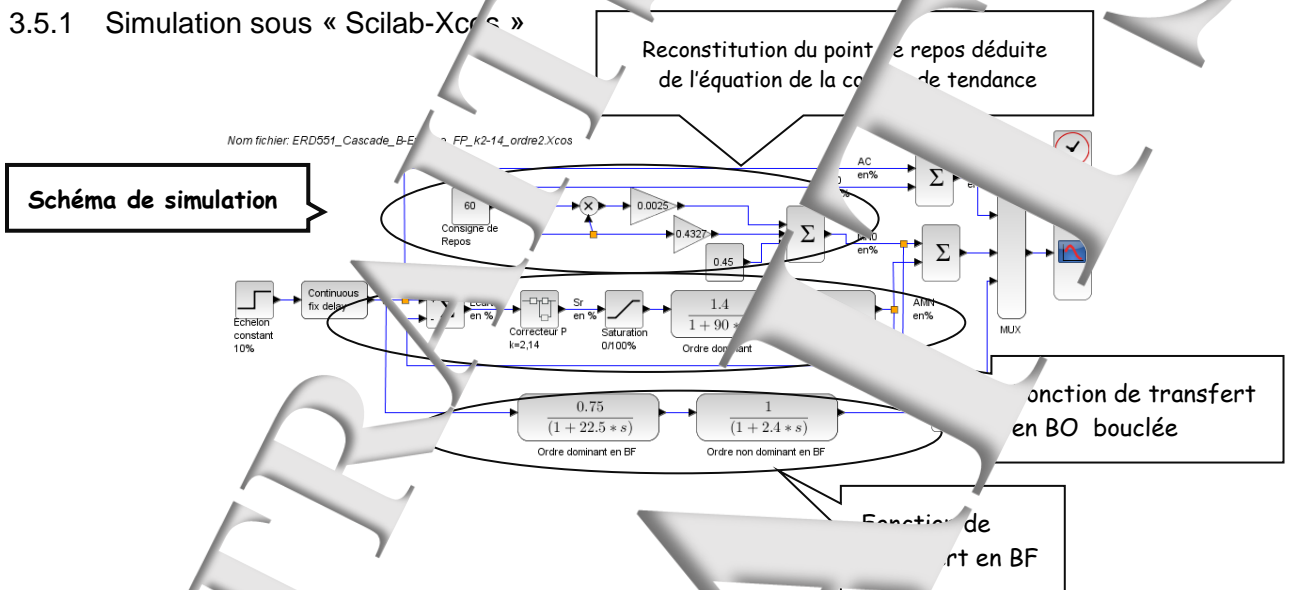
→ la pulsation  $\omega_{90}$  permet d'évaluer la constante de temps non dominante :  $\tau_{F2} = \frac{1}{\tau_{F1} \cdot (\omega_{90})^2} = 2,4 \text{ s}$

→ le rapport des amplitudes permet d'évaluer le coefficient d'amortissement :  $K_{v\omega_{90}} = \frac{K_{v0}}{2 \cdot \xi_F} \rightarrow \xi_0 = 1,53$

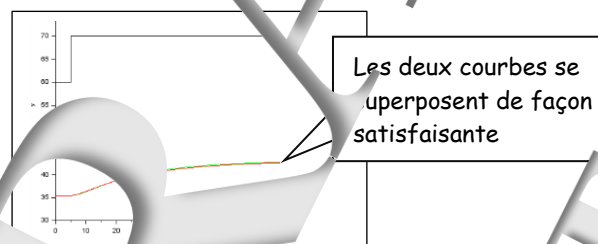


### 3.5 Validation du modèle par simulation et comparaison

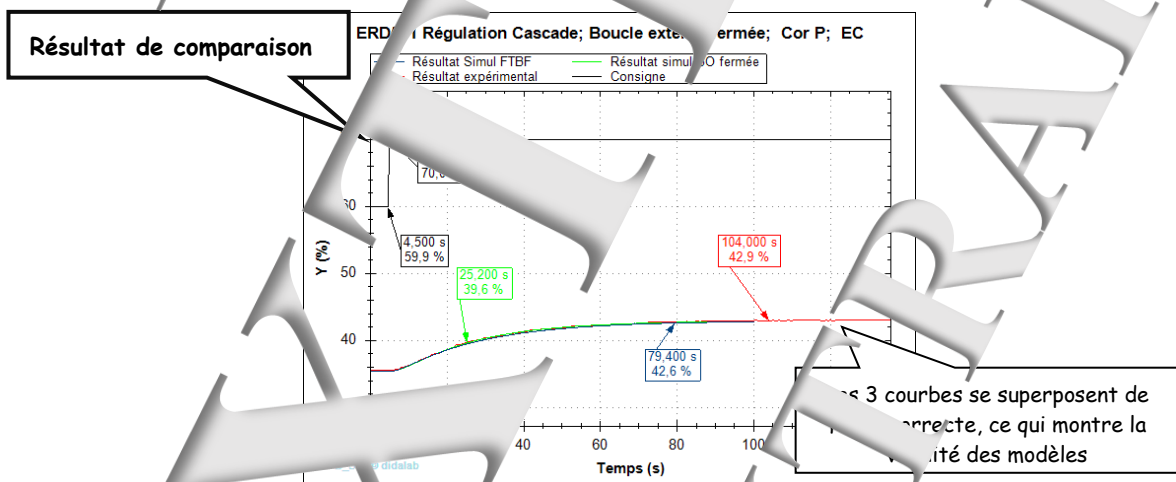
#### 3.5.1 Simulation sous « Scilab-Xcos »



#### Résultat de simulation



#### 3.5.2 Comparaison avec réponse expérimentale sous « D\_Scil »



→ Soit le modèle affiné de comportement en régime dynamique (en variation autour du point de repos), modèle d'ordre 2 décomposable

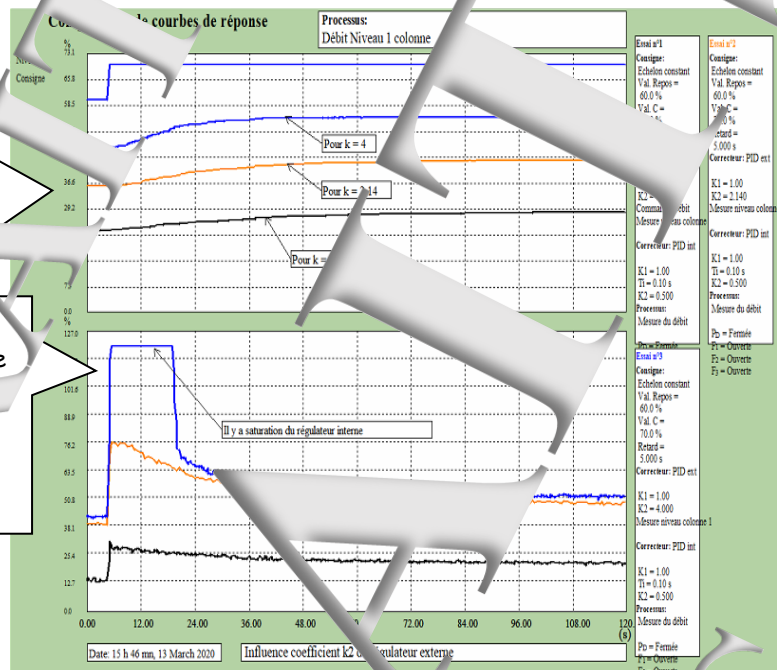
$$F_v(p) = \frac{0,75}{(1 + 22,5 \cdot p)(1 + 2,4 \cdot p)} \rightarrow \Delta M_N \text{ en \%}$$

Le modèle sous forme canonique :  $\omega_F = \frac{1}{\sqrt{22,5 \cdot 2,4}} = 0,2 \text{ rad/s}$   $\frac{2 \cdot \xi_F}{\omega_F} = 24,9 \rightarrow \xi_F = 1,69$

### 3.6 Influence du coefficient d'action P

Une augmentation du coefficient d'action proportionnelle  $k = k_2$   
 → diminue l'erreur statique (la mesure est plus proche de la consigne en régime final)  
 → diminue le temps de réponse (tant que la réponse n'est pas oscillatoire)

→ Une augmentation du coefficient d'action proportionnelle  $k = k_2$  augmente le risque de mise en saturation du régulateur (régulateur interne dans ce cas). Il y a diminution de la bande de proportionnalité.



## 4 - TP N°6.4 ETUDE D'UN SYSTÈME EN BUCLE FERMÉE

### 4.1 Pré-déterminations

→ Fonction de transfert du correcteur

$$k_2 \left( k_1 + \frac{1}{T_i \cdot p} \right) = k_2 \frac{1 + k_1 \cdot T_i \cdot p}{T_i \cdot p}$$

Si on admet un modèle du processus en BO :

On choisit :  $k_1 = 3$  et  $k_2 \cdot T_i = \tau_{01}$   
 (Compensation du régime dominant)

→ Fonction de transfert de la BO

$$O_{v(p)} = \frac{\Delta M_{N(p)}}{\Delta \varepsilon_{(p)}} = \frac{k_2 \cdot G_{v0}}{T_i \cdot p}$$

→ La fonction de transfert en BF et en variation :  $F_{v(p)} = \frac{\Delta M_{N(p)}}{\Delta \varepsilon_{(p)}} = \frac{k_2 \cdot G_{v0}}{T_i \cdot p + k_2 \cdot G_{v0}} = \frac{1}{1 + \frac{T_i}{k_2 \cdot G_{v0}} p}$

Le système en BF reste stable

→ Gain et constante de temps :  $\tau_{F1} = \frac{T_i}{k_2 \cdot G_{v0}}$

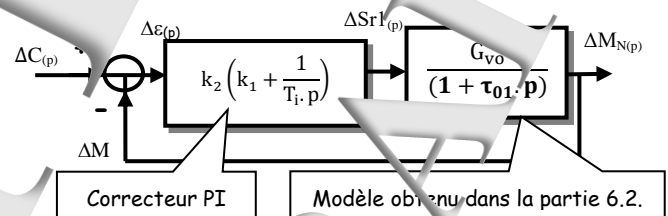
Si on souhaite que le système soit 4 fois plus rapide en BF qu'en BO, cela entraîne la relation :

$$\frac{T_i}{k_2 \cdot G_{v0}} = \frac{\tau_{01}}{4} \Rightarrow \frac{1}{k_2 \cdot G_{v0}} = \frac{3}{4} \Rightarrow k_2 = \frac{4}{3 \cdot G_{v0}} = \frac{4}{3 \cdot 1.4} \Rightarrow k_2 = 0,952$$

→ La constante de temps dominante vaudra :  $\tau_{F1} = \frac{\tau_{01}}{4} = \frac{8}{4} = 2 \text{ s}$

→ Le coefficient de transfert en variation vaudra :  $K_{Fv} = 1$

→ Le coefficient de transfert statique :  $K_{F0} = 1$

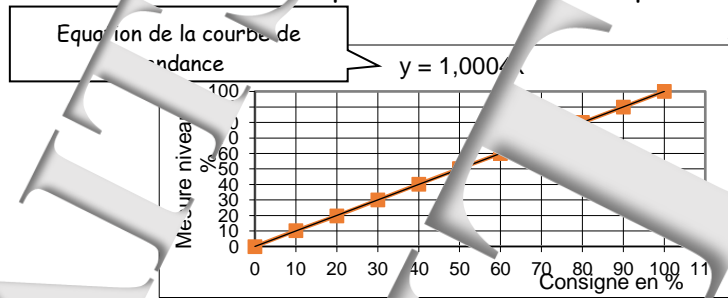


## 4.2 Etude en régime statique

Tableau de mesure

C en %	M <sub>N</sub> en %
20	19,8
30	30
40	40,2
50	50,2
60	60
70	70
80	80
90	90
100	100

Caractéristique de transfert statique :  $M_N = f_n(C)$

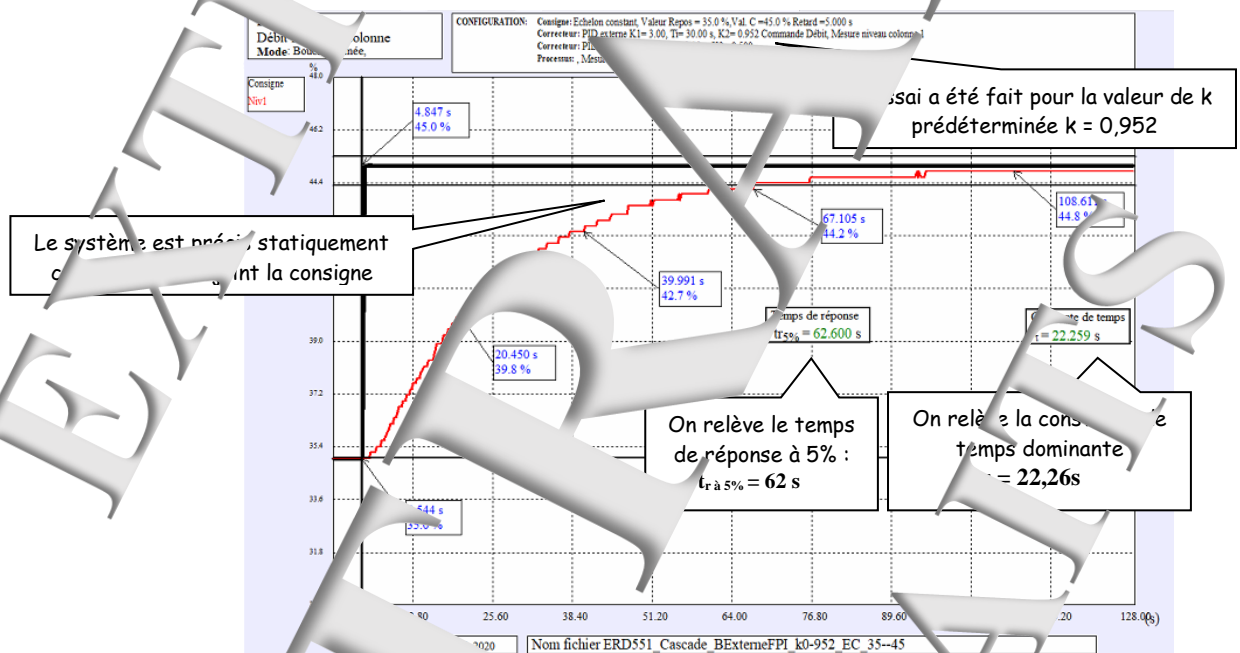


→ Le logiciel 'Excel' donne l'équation de la courbe de tendance :  $M_N \approx 1.C$

→ Si la mesure est égale à la consigne en régime statique, le système est précis statiquement.

## 4.3 Réponse à un échelon constant

### 4.3.1 Expérimentation



### 4.3.2 Exploitation

→ Vérification de la précision statique:  $t_{s\ 5\%}$  la mesure rejoint la consigne en régime établi

→ Vérification du coefficient de transfert en variation :  $k_{FV} = \frac{\Delta M_N}{\Delta C} \approx k_{FV}$

→ Vérification de la constante de temps dominante :

On relève  $\tau_{F1} = 22,26\text{ s}$  à comparer à 22,5 c'est O.K.

→ On relève le temps de réponse à 5% :  $t_{r\ 5\%} = 62,6\text{ s} \rightarrow t_{r\ 5\%} \approx 3 \cdot \tau$

Ce rapport de temps de réponse et constante de temps prouve que l'on est en présence d'un système

En première approximation, on pourra donc admettre :

$$F_v(p) \approx \frac{1}{1 + \tau_{F1} \cdot p} \quad \text{Avec : } \tau_{F1} = 22,2\text{ s}$$

En réalité, un zoom au début de la montée montre que la pente initiale est nulle, ce qui prouverait que le système est d'ordre supérieur à 1.

On modélise plus fidèlement par :

$$F_v(p) = \frac{1}{(1 + \tau_{F1} \cdot p)(1 + \tau_{F2} \cdot p)}$$

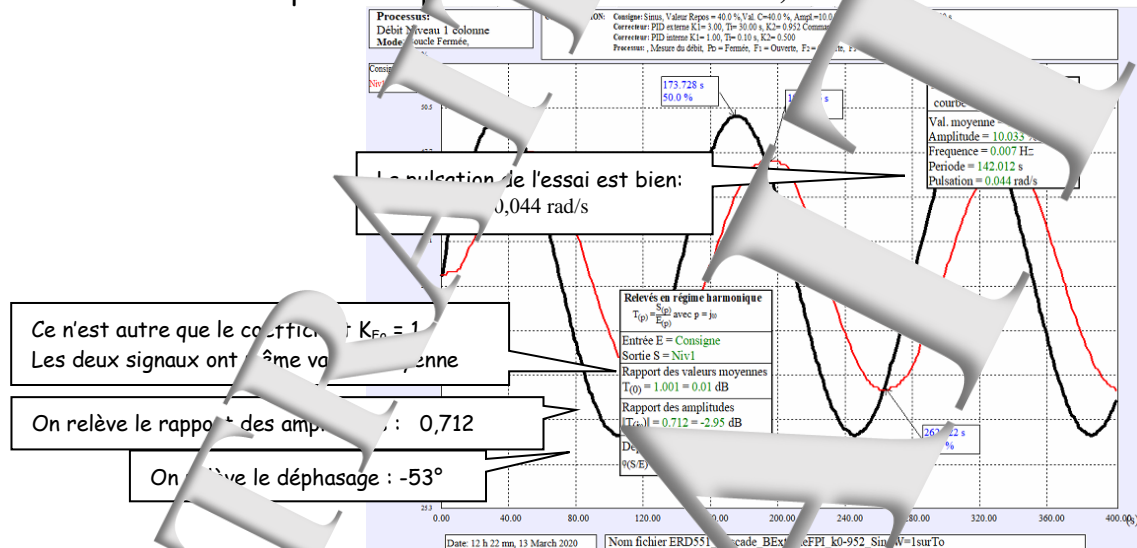
La constante de temps non dominante  $\tau_{F2}$  est à déterminer. Le rapport est moins grand en BF qu'en BO.



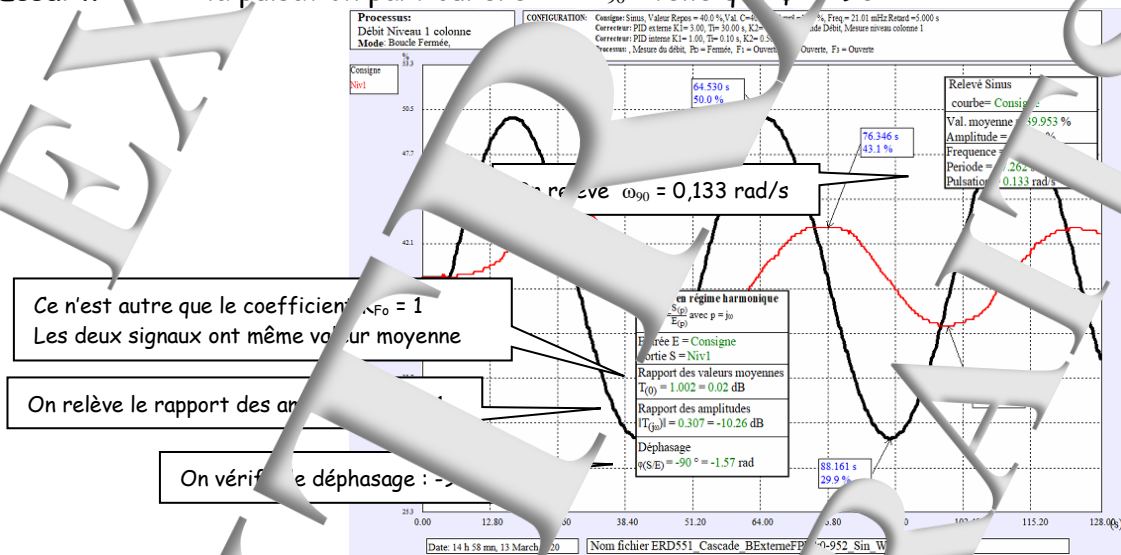
## 4.4 Etude en régime harmonique

### 4.4.1 Expérimentations

**Essai n°1** : A la pulsation particulière  $\omega = 1/\tau = 1/22,5 = 0,044 \text{ rad/s}$



**Essai n°2** : A la pulsation particulière  $\omega = \omega_{90}$  telle que  $\phi = -90^\circ$



### 4.4.2 Exploitations

#### De l'essai n°1

→ Vérification du rapport des amplitudes

Si on admet un modèle du premier ordre, à la pulsation particulière  $\omega = 1/\tau$ , l'atténuation doit être de  $\sqrt{2}$  soit le rapport  $\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{1,414} \approx 0,707$  c'est sensiblement ce qu'on relève.

→ Vérification du déphasage

Si on admet un modèle du premier ordre, à la pulsation particulière  $\omega = 1/\tau$ , le déphasage doit être égal à  $-45^\circ$ . On relève  $-53^\circ$ . C'est dû à la constante de temps non dominante de l'influence.

Si on considère que le surplus de déphasage ( $8^\circ$ ) est dû à une constante non dominante notée  $\tau_{F2}$

On peut en déduire une estimation :  $\text{Atan}(\tau_{F2} \cdot \omega) \approx 8^\circ$   $\tau_{F2} = \frac{\tan(8^\circ)}{0,044} \rightarrow \tau_{F2} \approx 4 \text{ s}$

#### De l'essai n°2

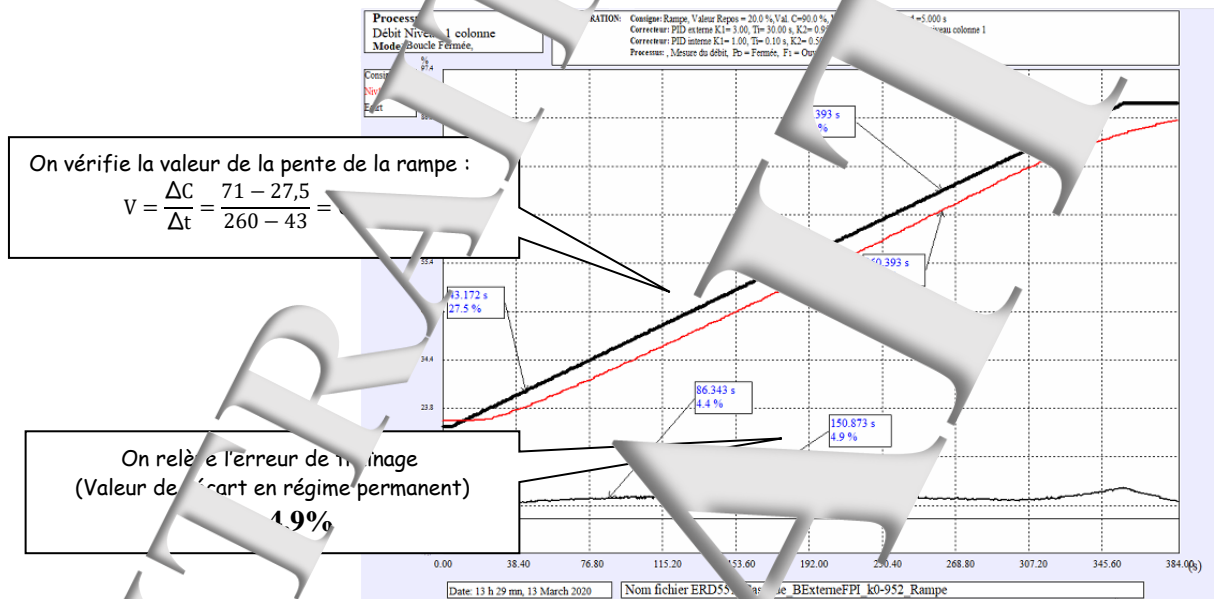
La pulsation  $\omega_{90}$  permet d'évaluer la constante de temps dominante :  $\tau_{F1} = \frac{1}{\omega_{90}^2} = 3,19 \text{ s}$

→ Le rapport des amplitudes permet d'évaluer le coefficient d'amortissement :  $K_{\omega_{90}} = \frac{1}{2 \cdot \xi_F} \rightarrow \xi_F = 1,63$



## 4.5 Réponse à un échelon de vitesse (rampe)

### 4.5.1 Expérimentation



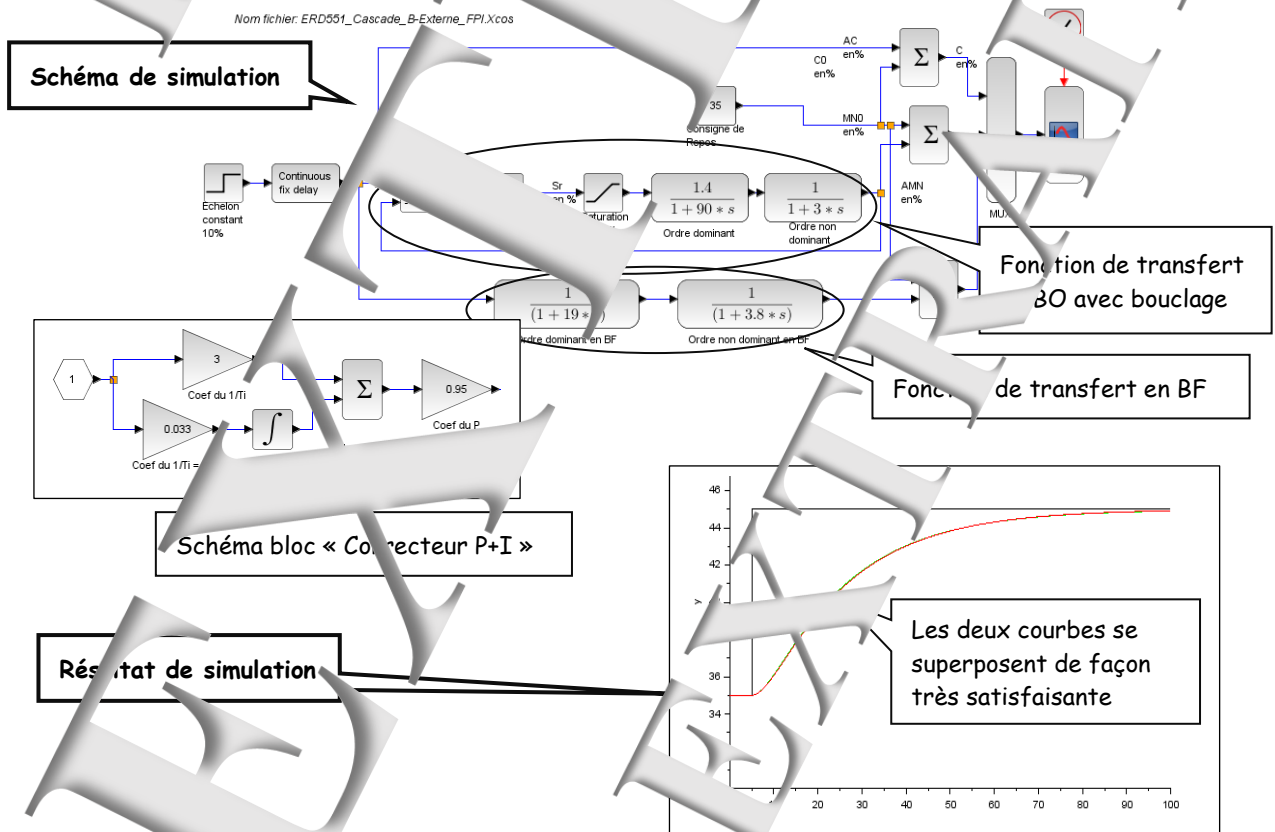
### 4.5.2 Exploitation

Cette valeur est à comparer à la valeur calculée à partir de l'expression théorique :

$$\varepsilon_T = V \frac{Z_E}{\omega_E} = 0,2 \cdot \left( \frac{2+1,63}{0,133} \right) = 4,9\% \rightarrow \text{OK}$$

## 4.6 Validation du modèle de simulation par comparaison

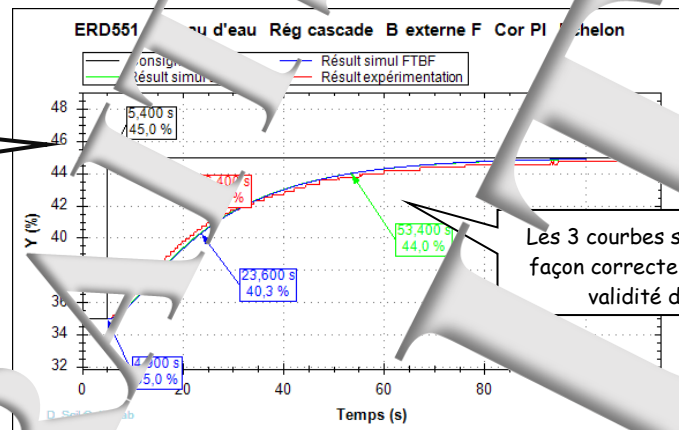
### 4.6.1 Simulation sous « Scilab-Xcos »





#### 4.6.2 Comparaison avec réponse expérimentale sous « D\_Scil »

Résultat de comparaison



→ Soit le modèle de comportement en régime dynamique (en variation autour du point de repos), modèle d'ordre 2 décomposable

Forme décomposée :

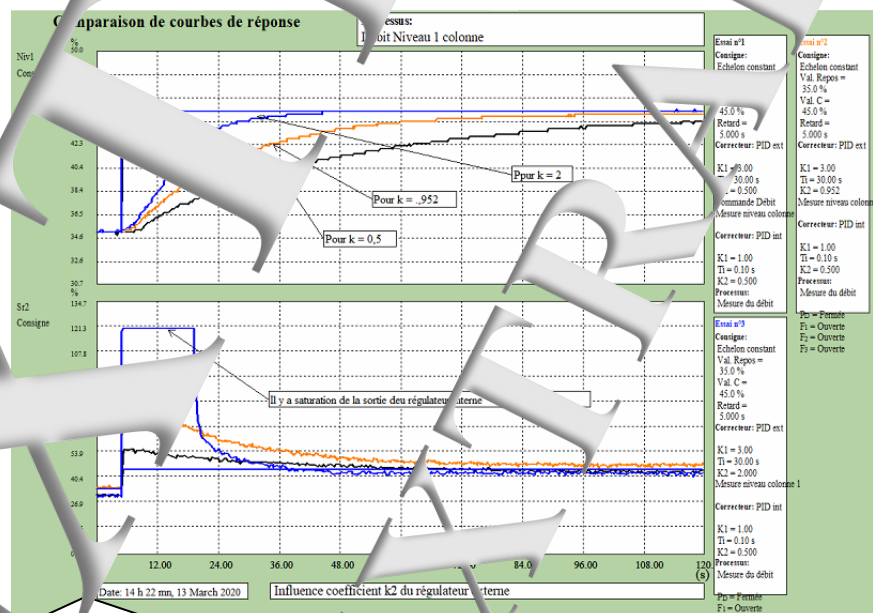
$\Delta C$   
en %

$$Fv(p) = \frac{1}{(1 + 16.p)(1 + 8.p)}$$

$\Delta M = \Delta M_N$   
en %

Forme non décomposée (canonique) :  $\omega_F = \sqrt{16 \times 3,6} = 28 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$  ;  $\frac{2}{\omega_F} = 19,8 \rightarrow \xi_F = 1,27$

#### 4.7 Influence du coefficient d'accélération



Augmentation du coefficient  $k_2$  rend le système plus rapide mais diminue la bande proportionnelle (saturation du régulateur) ; dans certains cas, rend le système instable.

# RESSOURCES

## Ouvrage

Automatique : régulations et asservissements :  
Cours - Applications - Expérimentations - Prototypages  
(Coll. Automatique et productique)

Auteurs : HANS Thierry, GUYÉNOT Pierre

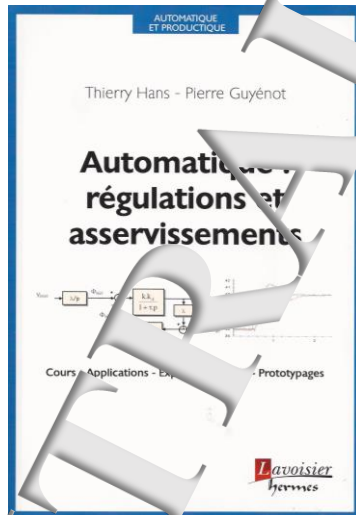
Langue : Français

Date de parution : 06-2014

Ouvrage 305 p. - 16.4x24 cm - Broché

ISBN : 9782746246317

**Lavoisier**  
hermes



## Sommaire

**PREMIERE PARTIE**  
Eléments de cours  
Exercices d'applications : énoncés – solutions

<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>11</b>
1.1. GENERALITES	11
1.2. CLASSES DE SYSTEMES	11
1.3. CARACTERISTIQUES D'UN SYSTEME	11
1.4. METHODOLOGIE	11
<b>2. LA TRANSFORMATION DE L'ESPACE</b>	<b>13</b>
2.1. DEFINITION	13
2.2. PROPRIETES	13
2.3. THEOREMES FONDAMENTAUX	20
2.4. EXERCICES D'APPLICATION	21
<b>3. FONCTIONS DE TRANSFERT ET SCHEMA-BLOCS</b>	<b>25</b>
3.1. DEFINITIONS	25
3.2. FONCTION DE TRANSFERT EN BOUCLE FERMEE	27
3.3. REPRESENTATIONS «A RETOUR UNITAIRE»	27
3.4. INFLUENCE DU BOULAGE	28
3.5. SYSTEME PERTURBE	29
3.6. EXERCICE 3-1: COMMANDE EN COUPLE D'UN MECANISME J.F.	29
3.7. EXERCICE 3-2: COMMANDE EN VITESSE D'UN MECANISME J.F.	31
<b>4. GENERALITES SUR LES REGIMES DYNAMIQUES</b>	<b>35</b>
4.1. INTRODUCTION	35
4.2. PRISE EN COMPTE DES CONDITIONS INITIALES	35
4.3. ETUDES DE REGIMES TRANSITOIRES TYPQUES	35
4.4. REGIME DYNAMIQUE ETABLI: REGIME HARMONIQUE	35
4.5. EXERCICE 4: REGIMES TRANSITOIRES SUR MECANISME J.F.	39
<b>5. SYSTEMES DU PREMIER ORDRE</b>	<b>43</b>
5.1. DEFINITIONS	43
5.2. FONCTION DE TRANSFERT EN BOUCLE FERMEE A RETOUR	43
5.3. COMPORTEMENT EN REGIME STATIQUE	44
5.4. REPONSE A UNE ENTREE EN ECHELON CONSTANT	44
5.5. REPONSE A UNE ENTREE EN RAMPE	46
5.6. REPONSE A UNE ENTREE SINUSOÏDALE	46
5.7. EXERCICE 5-1: IDENTIFICATION EXPERIMENTALE D'UN SERVOMECHANISME	50
5.8. EXERCICE 5-2: REGULATION DE LA TEMPERATURE D'UN FOUR	55
<b>6. SYSTEMES DU DEUXIEME ORDRE</b>	<b>59</b>
6.1. DEFINITIONS	59
6.2. FONCTION DE TRANSFERT EN BOUCLE FERMEE A RETOUR	59
6.3. COMPORTEMENT EN REGIME STATIQUE	60
6.4. REPONSE A UNE ENTREE EN ECHELON CONSTANT	60
6.5. REPONSE A UNE ENTREE EN RAMPE	67
6.6. REPONSE A UNE ENTREE SINUSOÏDALE	67
6.7. EXERCICE 6: REGULATION EN TEMPERATURE D'UN LOCAL	72
<b>7. SYSTEMES DU PREMIER ORDRE AVEC INTEGRATION</b>	<b>75</b>
7.1. DEFINITIONS	75
7.2. FONCTION DE TRANSFERT EN BOUCLE FERMEE A RETOUR UNITAIRE	75
7.3. COMPORTEMENT EN REGIME STATIQUE	76
7.4. REPONSE A UNE ENTREE EN ECHELON CONSTANT	76
7.5. REPONSE A UNE ENTREE SINUSOÏDALE	77
7.6. EXERCICE 7: ASSERVISSEMENT EN POSITION 1	79

<b>8. LIEUX D'EVANS ET REGIMES DOMINANTS</b>	<b>81</b>
8.1. DEFINITIONS ET GENERALITES	81
8.2. LIEUX D'EVANS	81
8.3. REGIMES DOMINANTS	84
8.4. EXERCICE 8: ASSERVISSEMENT EN POSITION 2	87
<b>9. PRECISION D'UN S.A.L.C.</b>	<b>91</b>
9.1. GENERALITES	91
9.2. PRECISION D'UN S.A.L.C.	91
9.3. PRECISION D'UN S.A.L.C.	91
9.4. PRECISION D'UN S.A.L.C.	91
9.5. PRECISION D'UN S.A.L.C.	91
9.6. EXERCICE 9: PRECISION D'UN S.A.L.C. EN CHARGE PESANTE	95
<b>10. STABILITE D'UN S.A.L.C.</b>	<b>99</b>
10.1. ETUDE A PARTIR D'UN A.F.T.B.O.	99
10.2. ETUDE A PARTIR D'UN A.F.T.B.O.	103
10.3. EXERCICE 10: STABILITE D'UN SYSTEME DU 1 <sup>er</sup> ORDRE AVEC INTEGRATION	105
10.4. EXERCICE 10: STABILITE D'UN SYSTEME DU 2 <sup>er</sup> ORDRE AVEC INTEGRATION	107
<b>11. CORRECTION PROPORTIONNELLE INTEGRALE DERIVEE (P.I.D.)</b>	<b>109</b>
11.1. EXPRESSIONS GENERALES	109
11.2. INFLUENCE SUR LE COMPORTEMENT EN BF D'UN CORRECTEUR P.	110
11.3. COMPORTEMENT ET INFLUENCE D'UN CORRECTEUR I. (INTEGRAL)	111
11.4. COMPORTEMENT ET INFLUENCE D'UN CORRECTEUR D. (DERIVEE)	112
11.5. COMPORTEMENT ET INFLUENCE D'UN CORRECTEUR P.I.	116
11.6. COMPORTEMENT ET INFLUENCE D'UN CORRECTEUR P.I.D.	118
11.7. COMPORTEMENT ET INFLUENCE D'UN CORRECTEUR P.I.D.	121
11.8. EXERCICE 11: CORRECTION P.I.; P.I.; P.D. D'UN SERVOMECHANISME	123
<b>12. AUTRES TECHNIQUES DE CORRECTION DES S.A.L.C.</b>	<b>133</b>
12.1. AGENCEMENT DES POLES DE LA FTBF	133
12.2. AGENCEMENT DES POLES DE LA FTBF	134
12.3. AGENCEMENT DES POLES DE LA FTBF	134
12.4. AGENCEMENT DES POLES DE LA FTBF	139
12.5. AGENCEMENT DES POLES DE LA FTBF	144
<b>13. REALISATIONS PRATIQUES DE CORRECTEURS</b>	<b>147</b>
13.1. STRUCTURE DE CORRECTEURS P.I.D. DANS LE DOMAINE «CONTINU»	147
13.2. SYNTHESE DE CORRECTEURS DANS LE DOMAINE «DISCRET»	148
13.3. TECHNIQUES D'INTERFACES AVEC LES PROCESSEURS	154
13.4. EXERCICE 13: REGULATEUR NUMERIQUE A «TRANS D'ONCES»	155
<b>14. ASSERVISSEMENTS DE PHASE</b>	<b>161</b>
14.1. GENERALITES	161
14.2. FONCTIONS DE TRANSFERT ET SCHEMA-BLOCS	161
14.3. EXERCICE 14: DEMODULATEUR FM	164
<b>15. SYSTEMES A RETARD PUR OU «A TEMPS MORT»</b>	<b>169</b>
15.1. COMPORTEMENT ET MODELISATION EN BO	169
15.2. COMPORTEMENT ET MODELISATION EN BF	171
15.3. CORRECTION AVEC COMPENSATION DU TEMPS MORT	174
15.4. EXERCICE 15-1: ASSERVISSEMENT DE COURANT D'UN MOTEUR	175
15.5. EXERCICE 15-2: ETUDE D'UNE REGULATION DE NIVEAU	180
<b>16. SYNTHESE PAR PROTOTYPAGE RAPIDE</b>	<b>187</b>
16.1. METHODOLOGIE ET OUTILS	187
16.2. EXERCICE 16: PROTOTYPAGE D'UNE REGULATION DE DEBIT D'EAU	189
<b>DEUXIEME PARTIE</b>	
Projet de synthèse	
Exercices de solutions	
<b>17. ASSERVISSEMENTS SUR POSTE DE DECOUPE</b>	<b>199</b>
BUT ET DESCRIPTION FONCTIONNELLE DU SYSTEME	199
ENONCE	201
SOLUTION	202
<b>18. REGULATION DE TEMPERATURE A RETOUR</b>	<b>211</b>
BUT ET DESCRIPTION FONCTIONNELLE DU SYSTEME	211
ENONCE	213
SOLUTION	214
<b>19. ETUDE D'UN CAPTEUR DE VITESSE</b>	<b>217</b>
BUT ET DESCRIPTION FONCTIONNELLE DU SYSTEME	217
ENONCE	218
SOLUTION	220
<b>20. ASSERVISSEMENT EN VITESSE POUR 'FOLDER'</b>	<b>225</b>
BUT ET DESCRIPTION FONCTIONNELLE DU SYSTEME	225
ENONCE	227
SOLUTION	229
20.1. ASSERVISSEMENT EN VITESSE D'UN MOTEUR TRACTEUR	231
20.2. ASSERVISSEMENT EN POSITION DE LA BALANCE	235
ENONCE	236
SOLUTION	237
<b>ANNEXES</b>	<b>241</b>
1- ABACQUES RELATIFS AUX SYSTEMES DU DEUXIEME ORDRE	241
2- ABACQUES RELATIFS AUX SYSTEMES DU DEUXIEME ORDRE	245
<b>EXERCICES</b>	<b>249</b>
<b>INDEX</b>	<b>253</b>

## Didacticiel gratuit « D\_CCA\_Eval »



### Objet

Le logiciel « D\_CCA » permet le **Contrôle et la Commande d'Applications** développées par la société **Didalab** dans le domaine des régulations et asservissements.

Le logiciel « D\_CCA\_Eval » a deux objectifs :

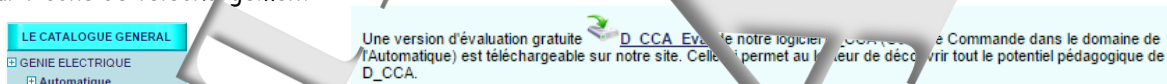
- ↳ Evaluer les possibilités du logiciel « D\_CCA » par l'exploitations d'enregistrements expérimentaux, préalablement effectués sur les applications « Didalab » et ce, sans y être relié ;
- ↳ reproduire les exploitations d'essais expérimentaux et de prototypages rapides développées dans l'ouvrage « **Automatique : régulations et asservissements** » écrit par T. Hans et P. Guyénot, ouvrage édités aux éditions « Lavoisier ».

### Téléchargement :

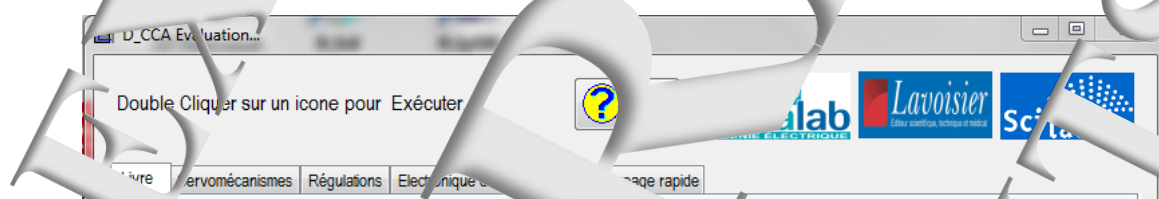
A partir du site :

[www.didalab.fr](http://www.didalab.fr)  
DIDALAB / Matériels Didactiques, Enseignement Technique et Supérieur

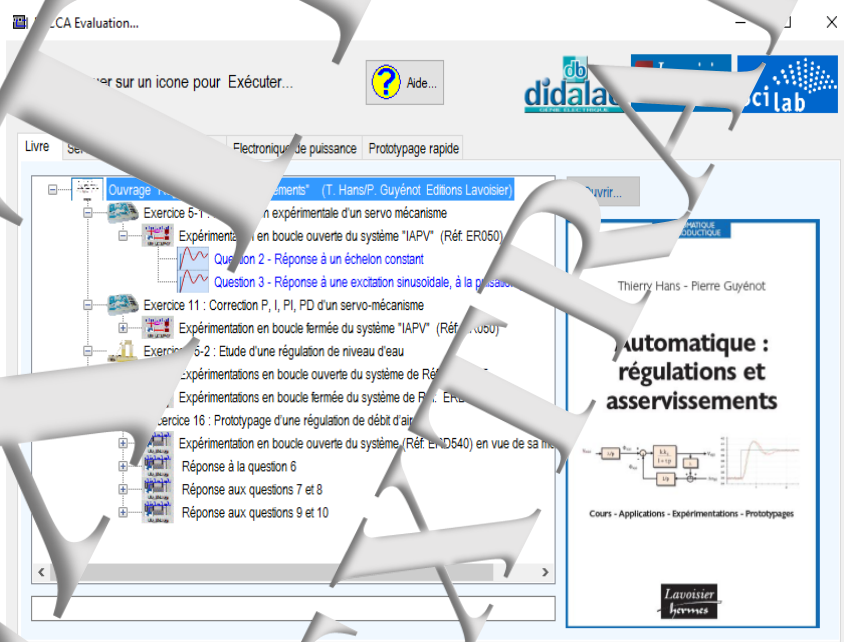
Dans le menu « LE CATALOGUE GENERAL » Cliquer' sur « GENIE ELECTRIQUE » puis sur « Automatique » et enfin sur l'icône de téléchargement :



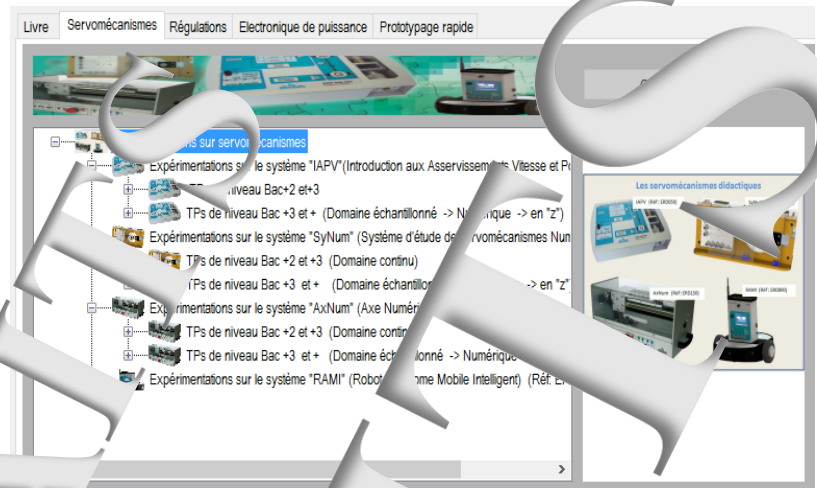
### Présentation :



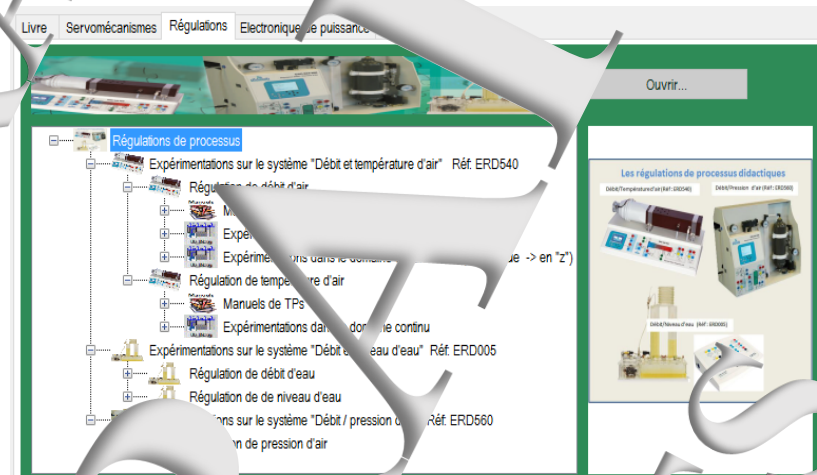
→ Le menu « Livre »



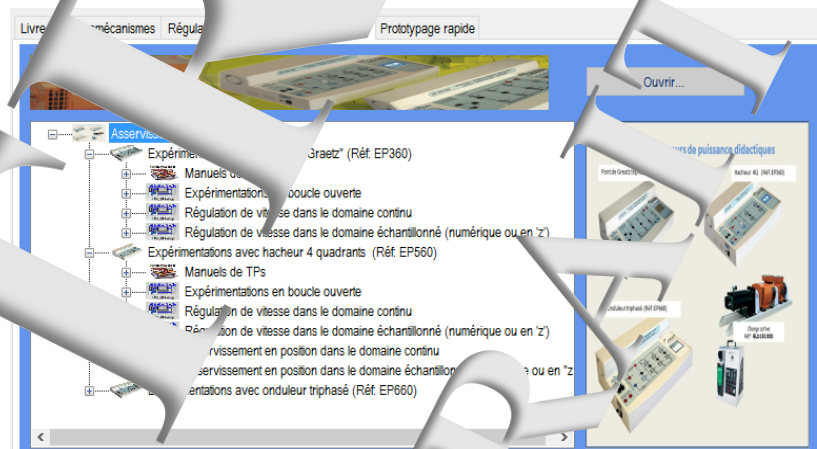
→ Le menu « Servomécanismes »



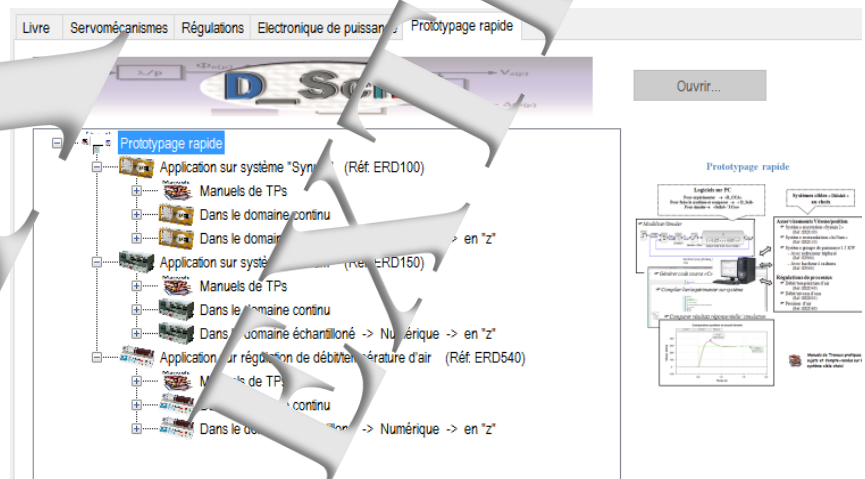
→ Le menu « Régulations »



→ Le menu « Elec de puissance »



→ Le menu « Prototypage rapide »



Version : Mars 2020





**Didalab**  
Z.A. de Saint-Pierre  
du Groupe Manoukian  
59100 ELANCOURT  
FRANCE



**(33) 1 30 66 08 88**  
Du lundi au vendredi  
de 9h à 12h30  
et de 14h à 18h



Fax: (33)1 30 66 72 20



**www.didalab.fr**  
E-mail: didalab@didalab.fr