

# Rapport de Projet

## Modélisation et asservissement du turboréacteur DGEN 380

RICHELET Arthur  
REYNAUD Maxime  
FONTENELLE Dorian

DELMOTTE-DIAS Hélène  
PASQUET Xavier

Encadrant: M. FARGUES

Décembre 2022



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Abstract</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Réalisation du projet</b>	<b>3</b>
2.1	Analyse du système . . . . .	4
2.2	Modélisation du système . . . . .	7
2.2.1	Modélisation par analyse temporelle . . . . .	7
2.2.2	Modélisation par analyse fréquentielle . . . . .	8
2.3	Systèmes de commande en boucle ouverte . . . . .	10
2.4	Système de commande en boucle fermée . . . . .	11
2.4.1	Loi de commande proportionnelle . . . . .	11
2.4.2	Loi de commande intégrale . . . . .	12
2.4.3	Loi de commande proportionnelle intégrale . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Conclusion</b>	<b>13</b>

# Abstract

Le but de ce projet est de réaliser un asservissement du turboréacteur DGEN 380. Dans ce petit moteur de jet, la vitesse de rotation de la turbine est liée à la quantité de carburant injecté dans la chambre de combustion mais aussi des perturbations externes comme la température, la pression de l'air ambiant ou la vitesse de l'air entrant dans le compresseur.

L'objectif principal est de déterminer une loi de commande permettant d'atteindre un certain régime moteur en fonction de la position de la manette des gaz à l'aide de fonctions de transfert. L'outil principal utilisé pour la réalisation de ce projet est le logiciel *MATLAB/Simulink*.

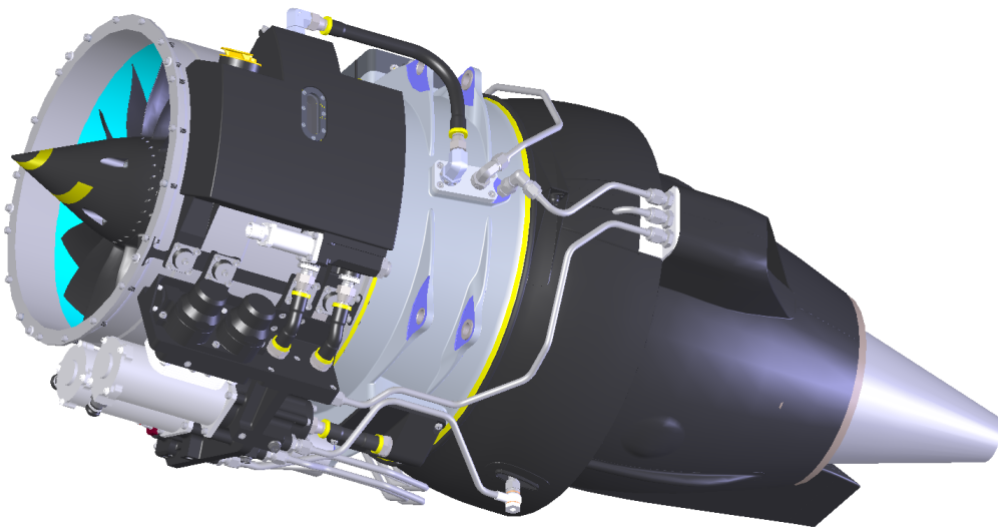


FIGURE 1.1 – le Turboréacteur DGEN 380

# Réalisation du projet

Tout d'abord, afin d'utiliser le moteur turbofan DGEN 380 nous avons besoin d'une loi de commande qui va permettre de gérer le moteur afin d'atteindre une certaine vitesse. Dans notre cas, nous essayons de nous rapprocher au maximum du fonctionnement réel du moteur. Nous avons à notre disposition sur SimuLink, le modèle réel utilisé pour simuler le comportement dynamique du moteur. A partir de cela nous construisons autour de cette base une loi de commande qui permettra d'avoir les résultats correspondants aux réactions réelles du système. Pour cela, il existe plusieurs moyens de la trouver, ces solutions seront plus ou moins précises suivant la façon dont elles sont trouvées.

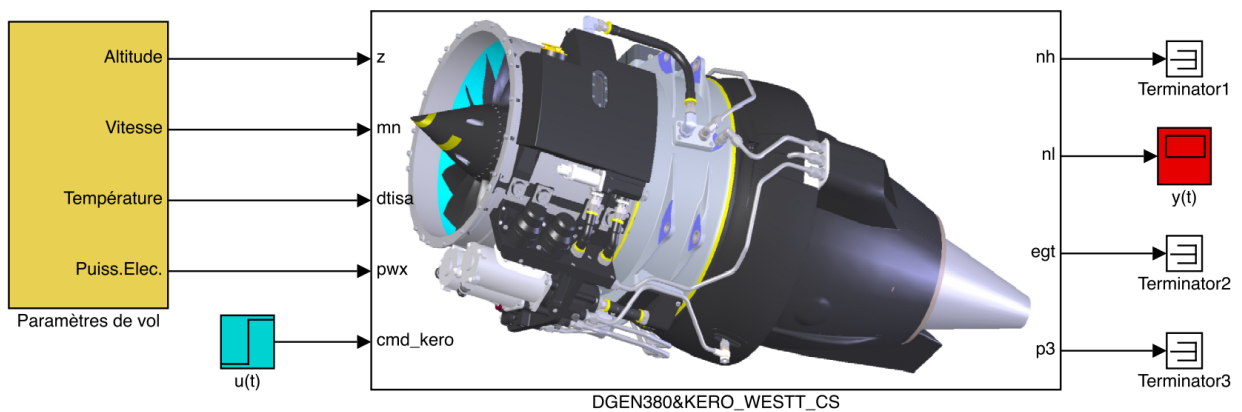


FIGURE 2.1 – Modèle "boîte noire" du turboréacteur DGEN 380 dans Simulink

## 2.1 Analyse du système

Dans cette partie, l'objectif est de déterminer une approximation linéaire du système de manière à pouvoir l'utiliser pour déterminer les lois de commande. Pour cela, la première étape consiste à s'assurer que le système est stable. Sinon nous ne pouvons pas faire d'approximation linéaire. On trace donc la réponse temporelle pour un échelon d'amplitude 50.

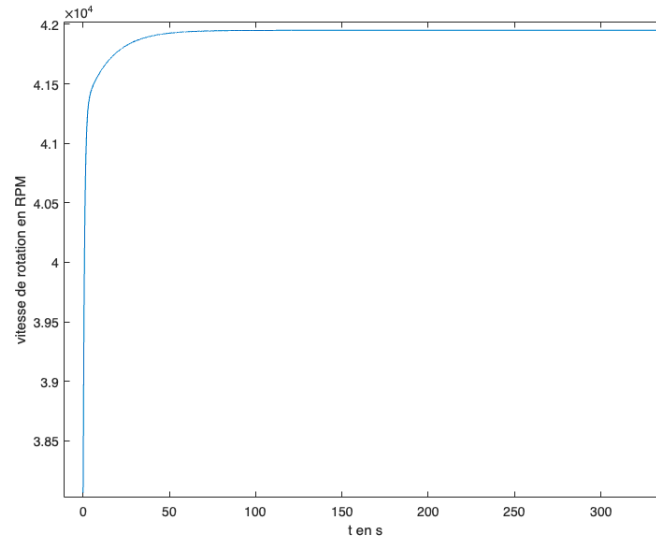


FIGURE 2.2 – Réponse temporelle du système à un échelon d'amplitude 50

On constate alors que la courbe tend vers une asymptote. Cela signifie que le système est stable. Ensuite on étudie l'effet sur le système de la variation des différents paramètres :  $h(t)$  l'altitude à laquelle se trouve l'avion en mètres,  $v(t)$  la vitesse en Mach et  $T(t)$  la différence de température. On trace donc la même réponse temporelle avec tous les paramètres constants et on fait plusieurs courbes avec différentes valeurs de  $\Delta T$

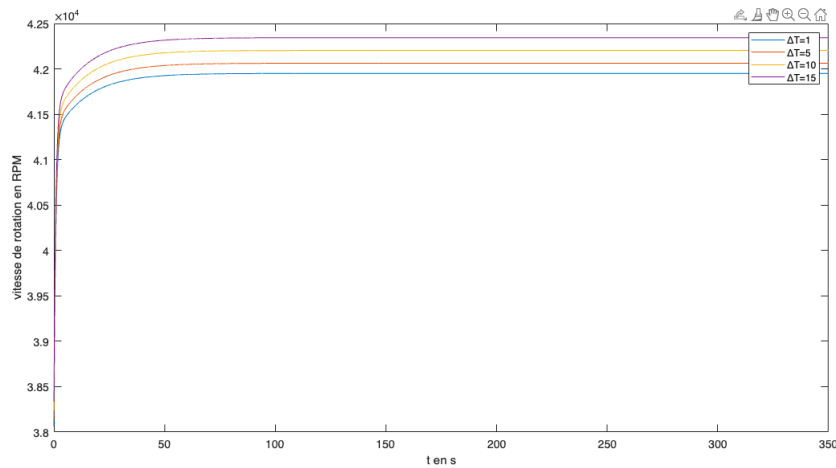


FIGURE 2.3 – Réponses temporelles du système pour des valeurs de  $\Delta T$  différentes

On choisit alors de fixer  $T(t) = 1\Delta_{ISA}$  pour le reste de l'étude et on trace les mêmes réponses pour des variations de  $h(t)$  et  $v(t)$ .

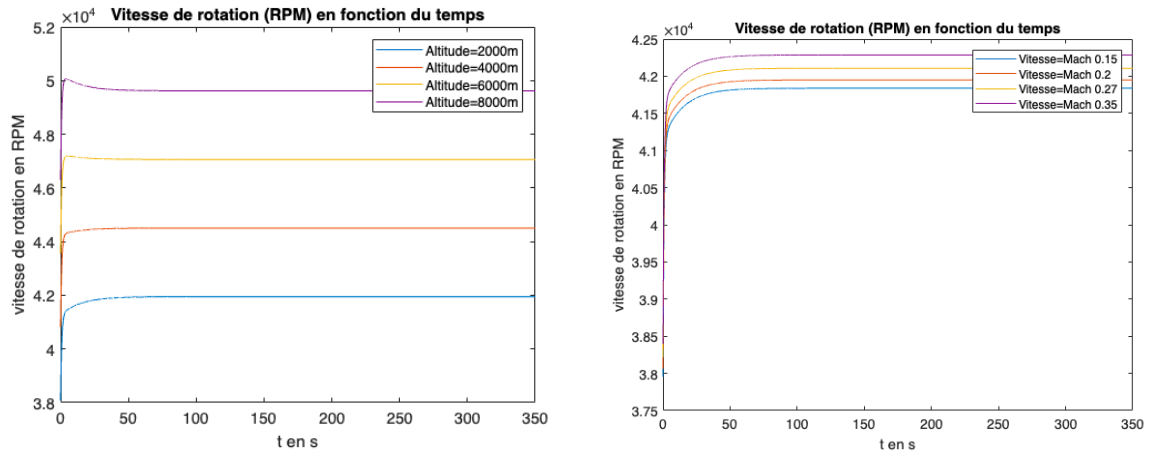


FIGURE 2.4 – Réponses temporelles du système pour des valeurs de  $v(t)$  et  $h(t)$  différentes

On choisit de fixer  $h(t) = 2000m$  et  $v(t) = 0.2 Mach$  pour le reste de l'étude. Il faut ensuite trouver la valeur du point d'équilibre pour les constantes choisies. On trace la réponse temporelle du système à un échelon de 50 pour  $h(t) = 2000m$ ,  $v(t) = 0.2 Mach$  et  $T(t) = 1\Delta_{ISA}$ .

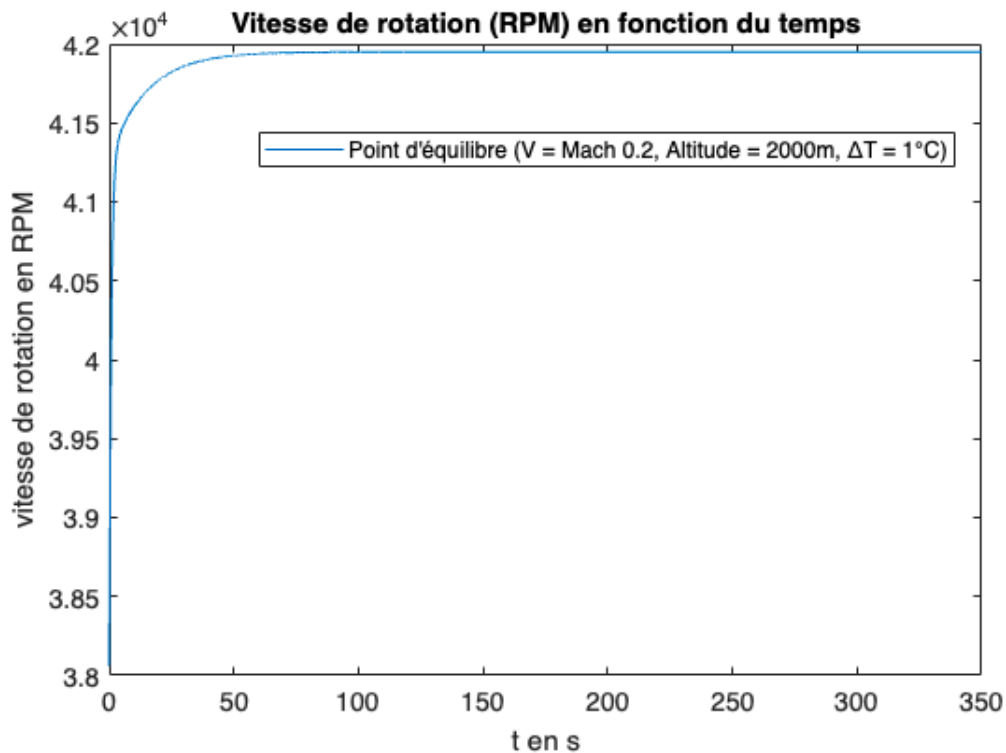


FIGURE 2.5 – Réponse temporelle du système à un échelon d'amplitude 50 pour les constantes choisies

Le point d'équilibre du système pour les constantes choisies est donc de  $y = 41950 \text{ RPM}$ . L'étape suivante consiste à déterminer un échelon dont la réponse du système est proche de la réponse d'un système linéaire. Il faut alors tracer deux réponses indicielles pour deux échelons d'amplitude  $\Delta = 10$  et  $\Delta = 20$ .

Pour mieux visualiser la différence, on remet les axes à zéro et on met à l'échelle un demi la réponse à l'échelon d'amplitude  $\Delta = 20$ .

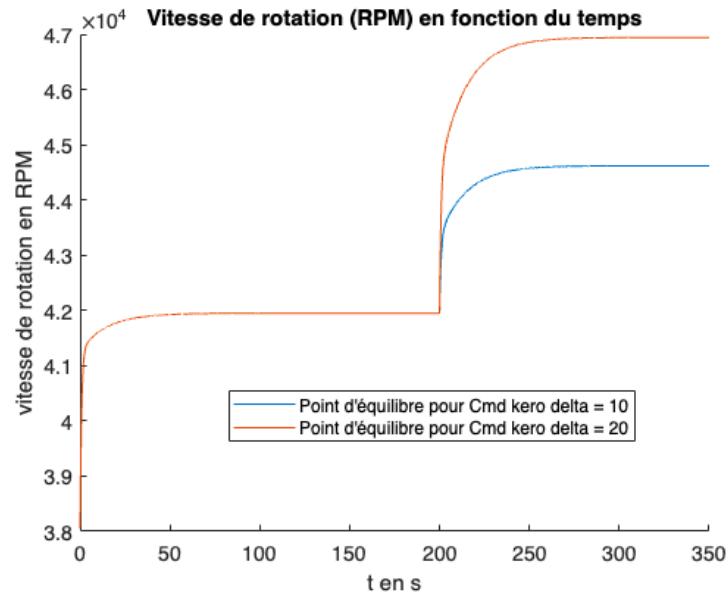


FIGURE 2.6 – Réponses temporelles du système à des échelons d'amplitude 10 et 20

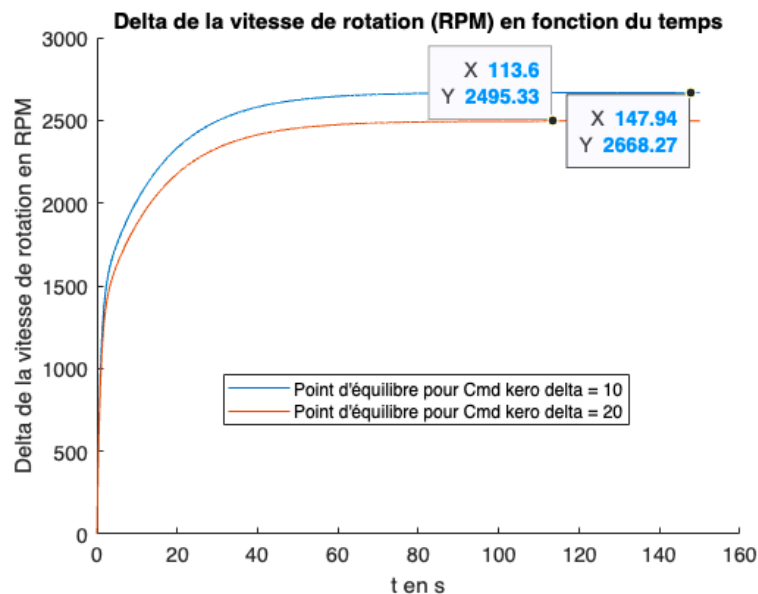


FIGURE 2.7 – Réponses temporelles du système à des échelons d'amplitude 10 et 20 mises à l'échelle

Dans un système linéaire, les deux courbes des réponses mises à l'échelles doivent être superposées. Or ce n'est pas le cas ici, on observe une différence de 172 tours par m minute entre les deux valeurs d'équilibre. On en déduit alors que le système qui modélise le DGEN 380 n'est pas linéaire. Il va alors falloir procéder à un approximation du système par un système linéaire lors de la modélisation.

## 2.2 Modélisation du système

### 2.2.1 Modélisation par analyse temporelle

Lors de la modélisation du turboréacteur, une valeur d'échelon de  $\Delta = 1$  sera choisie car autour de cette valeur, le comportement du système est quasi-linéaire. Ce qui permettra de simplifier la modélisation du système.

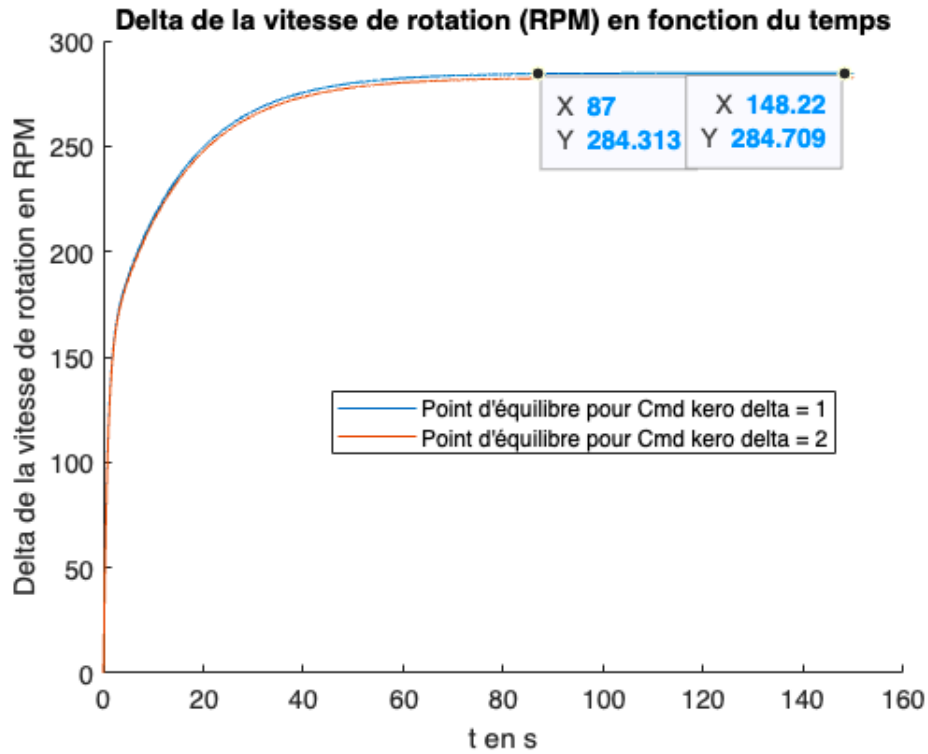


FIGURE 2.8 – Réponses temporelles du système à des échelons d'amplitude 1 et 2 mises à l'échelle

On peut alors commencer à modéliser le système par une fonction de transfert du premier ordre de la forme :

$$G(p) = \frac{K}{p + \tau} \quad (2.1)$$

où  $K$  est le gain statique du système et  $\tau$  le temps de réponse du système.

D'après le tracé de la réponse indicielle, on peut déterminer la valeur de  $K$  et de  $\tau$ .

On trouve pour un échelon de  $\Delta = 1$  :

$$\begin{cases} K = 142.35 \\ \tau = 1.77 \text{ s} \end{cases} \quad (2.2)$$

On peut alors tracer la réponse indicielle de cette première approximation du système.



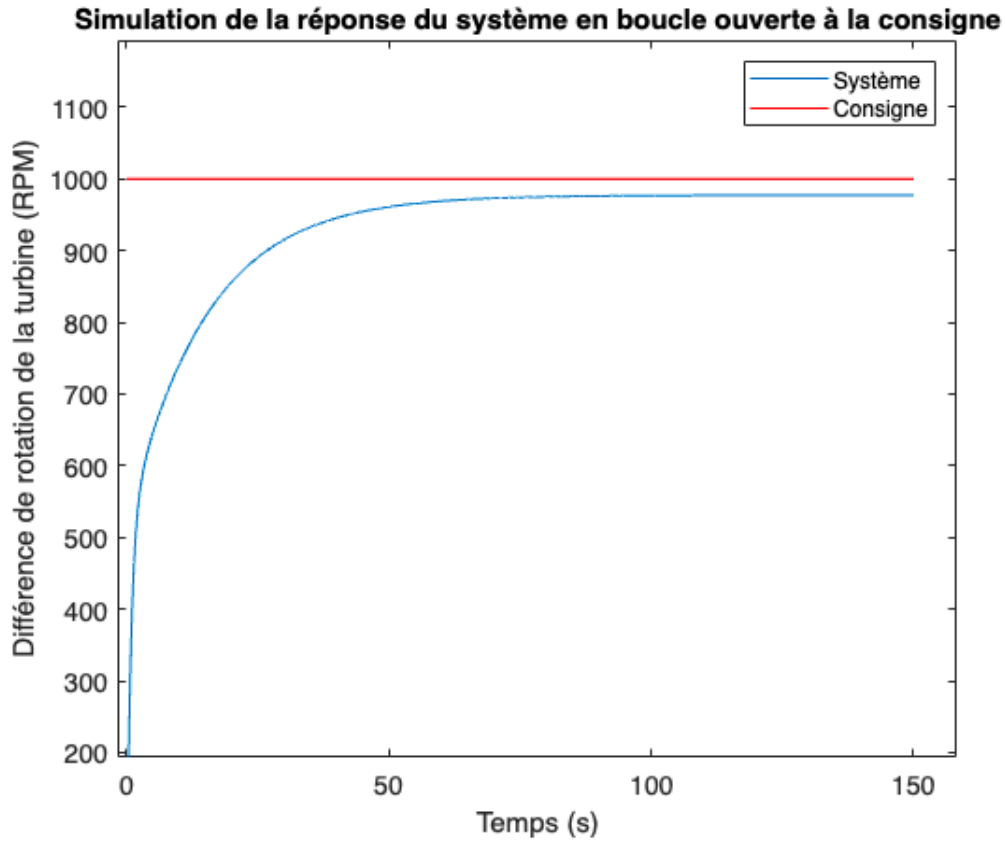


FIGURE 2.9 – Réponse temporelle du système à un échelon d’amplitude 1 avec la première approximation

On constate que la première approximation du système est incorrecte. Il faut alors utiliser une autre méthode pour déterminer un modèle plus précis.

### 2.2.2 Modélisation par analyse fréquentielle

Pour modéliser la fonction de transfert du système avec plus de précision, on va effectuer une analyse fréquentielle du système. On va donc récupérer les valeurs de gain et de déphasage du système pour différentes fréquences en entrée.

Pulsation $rad/s^{-1}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$	10	$3 \cdot 10$	$10^1$	$3 \cdot 10^1$
Gain	268.5	284.2	276	206	174.2	150	124.6	60	17	3.66
Gain $dB$	48.5	49	48	46	44	43	41.9	35.5	24	11.26
Décalage $s$	3.9	6.2	5.9	3.7	2.12	1	0.752	0.437	0.713	0.06
Phase (degrés)	-0.22	-3.5	-13.5	-21.2	-24.29	-28.6	-43	-75	-99	-103

(2.3)

Après avoir obtenu les valeurs de ce tableau, on peut tracer un diagramme de Bode pour déterminer l’ordre du système et les valeurs des constantes de ce dernier. On fait coïncider la courbe de la réponse fréquentielle du système avec celle de notre approximation afin de déterminer les constantes du système.

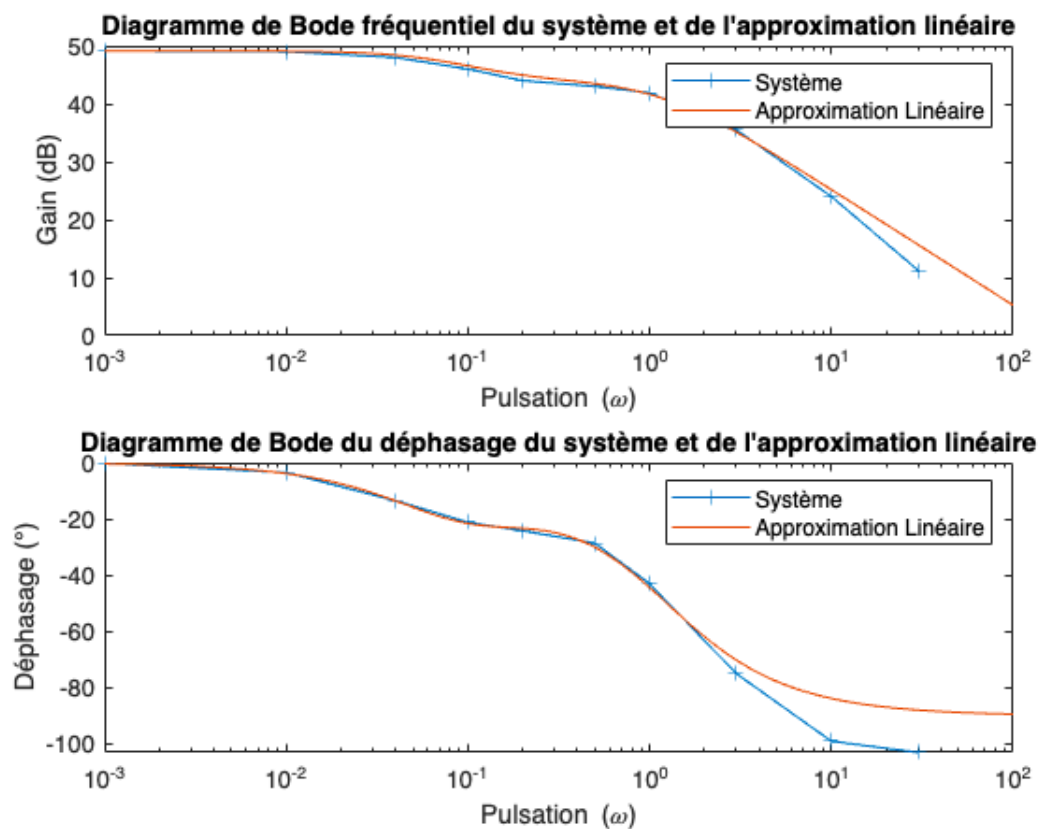


FIGURE 2.10 – Diagramme de Bode du système et de l'approximation d'ordre 3

On trouve alors que le système est d'ordre 3, de forme :

$$G(p) = \frac{K}{(p + \tau_1)(p + \tau_2)(p + \tau_3)} \quad (2.4)$$

et possède donc 3 constantes de temps nommées  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  et  $\tau_3$  où :

$$\begin{cases} \tau_1 = 0.0135 \\ \tau_2 = 0.075 \\ \tau_3 = 1.1 \\ K = 268.5 \end{cases} \quad (2.5)$$

Après avoir calculé cette approximation nous allons ensuite pouvoir ajouter à cette fonction de transfert un correcteur afin de pouvoir contrôler la sortie du système.

## 2.3 Systèmes de commande en boucle ouverte

Après cette modélisation du comportement du turboréacteur. On obtient une fonction de transfert utilisable de la forme :

$$G(p) = \frac{\Delta Y(p)}{\Delta U(p)} \quad (2.6)$$

Grâce à cette fonction de transfert, on peut alors déterminer une loi de commande afin d'amener la vitesse à une valeur de référence  $\Delta y(t)$  aussi appelée consigne  $\Delta r(t)$ . Cette consigne représente la vitesse souhaitée par l'utilisateur autour du point d'équilibre.

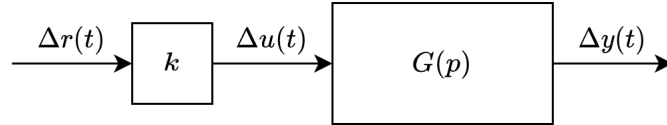


FIGURE 2.11 – Schéma d'un système en boucle ouverte

On sait qu'en régime permanent la consigne est égale à la sortie du système, et que la sortie du système est égale à la valeur de référence multipliée par le gain statique du système. Soit :

$$\begin{cases} \Delta u(t) = K \cdot \Delta y(t) \\ \Delta y(t) = \Delta r(t) \end{cases} \quad (2.7)$$

On peut alors déterminer aisément la valeur de  $k$ . On obtient alors :  $k = \frac{1}{K} = 3.49 \cdot 10^{-3}$

Avec ces valeurs on peut alors tester la loi de commande en boucle ouverte pour une consigne de  $\Delta r(t) = 1000 \text{ RPM}$ , ce qui revient à amener la vitesse de rotation du moteur à 1000 tours par minute au dessus de sa vitesse d'équilibre.

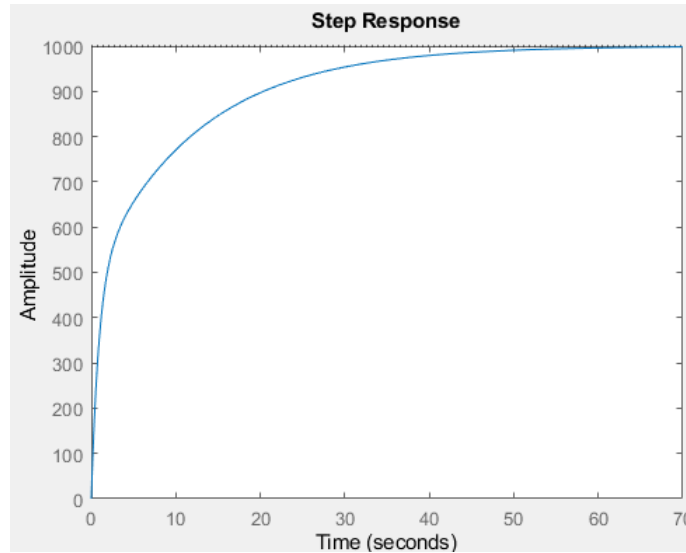


FIGURE 2.12 – Réponse du système à la loi de commande en boucle ouverte

À partir de ce système on peut déterminer le temps de réponse du système, c'est à dire le temps nécessaire au système pour atteindre 95% de sa valeur finale après un changement de consigne. On obtient alors un temps de réponse  $T_{95\%} = 29.1s$ . Cependant, en substituant le modèle par le turboréacteur on constate que la valeur finale n'est pas de 1000 tours par minute mais de 974 tours par minute. Cette légère différence est due au fait que le modèle est une approximation du système et donc ne prend pas en compte les effets non linéaires du système.

## 2.4 Système de commande en boucle fermée

### 2.4.1 Loi de commande proportionnelle

Pour améliorer le comportement du système, on peut ajouter une rétro-action dans la loi de commande, transformant ainsi le système en une boucle fermée. Cette rétro-action permet de corriger les erreurs de mesure du système et donc d'améliorer sa réponse.

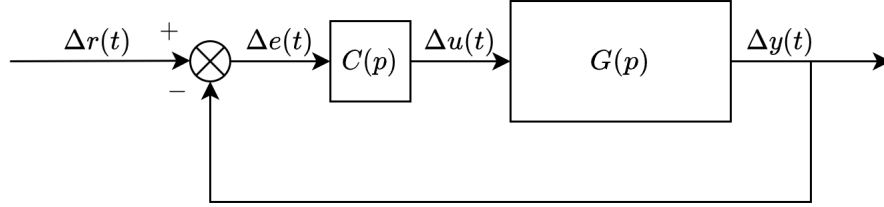


FIGURE 2.13 – Schéma d'un système en boucle fermée

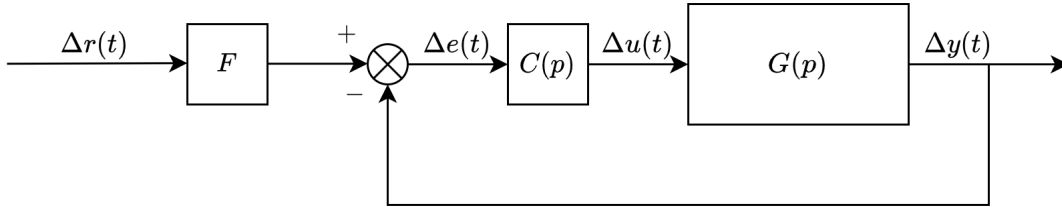


FIGURE 2.14 – Schéma d'un système en boucle fermée avec précompensateur

Un correcteur proportionnel est utilisé premièrement dans la boucle rétro-active afin de corriger les erreurs de mesure. On obtient alors la loi de commande proportionnelle suivante :

$$\begin{cases} \Delta u(t) = K_p \cdot \Delta e(t) \\ C(p) = K_p \end{cases} \quad (2.8)$$

Grâce à l'outil *Sisotools* de *MATLAB* on peut alors déterminer le gain proportionnel  $k_p$  de la loi de commande. On obtient alors  $k_p = 0.0096$ . En utilisant cette valeur on peut alors tester la loi de commande en boucle fermée pour une consigne de  $\Delta r(t) = 1000 \text{ RPM}$ . On obtient alors une valeur en régime permanent de  $\Delta y_\infty = 732 \text{ RPM}$ , et un temps de réponse  $T_{95\%} = 10s$ . Malgré une amélioration du temps de réponse, il reste toujours une différence entre la consigne et la valeur finale. Pour remédier à cela, on ajoute un précompensateur à la consigne afin de réduire cette différence. On obtient alors la loi de commande

$$\Delta u(t) = K_p \cdot (F \cdot \Delta r(t) - \Delta y(t)) \quad (2.9)$$

En réglant la valeur du précompensateur  $F$  on peut alors obtenir une valeur en régime permanent de  $\Delta y_\infty = 1000 \text{ RPM}$  pour une valeur de  $F = 1.35$ . Le gain statique de la loi de commande est alors bien égale à 1.

### 2.4.2 Loi de commande intégrale

Dans un second temps on retire le précompensateur et on remplace le correcteur proportionnel par un correcteur intégral. On obtient alors la loi de commande suivante :

$$\begin{cases} \Delta u(t) = K_i \cdot \int_0^t \Delta e(t) dt \\ C(p) = \frac{1}{T_i \cdot p} \end{cases} \quad (2.10)$$

L'utilisation d'un intégrateur permet de réduire le temps de réponse du système en réduisant l'erreur de mesure. Grâce à *Sisotools* on obtient alors un gain intégral  $k_i = 0.00089303$ . En utilisant cette valeur on peut alors tester la loi de commande en boucle fermée pour une consigne de  $\Delta r(t) = 1000 \text{ RPM}$ . Le temps de réponse est légèrement amélioré et l'erreur de mesure est éliminée.

### 2.4.3 Loi de commande proportionnelle intégrale

Enfin, en combinant les correcteurs proportionnel et intégral, on obtient la loi de commande suivante :

$$\begin{cases} \Delta u(t) = K_p \cdot \Delta e(t) + K_i \cdot \int_0^t \Delta e(t) dt \\ C(p) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot p}\right) \end{cases} \quad (2.11)$$

Grâce à *Sisotools* on peut alors déterminer les valeurs de  $K_p$  et  $T_i$  afin d'avoir une loi de commande plus précise avec un temps de réponse moindre. On obtient alors :

$$\begin{cases} K_p = 0.009213 \\ T_i = 1.1765 \end{cases} \quad (2.12)$$

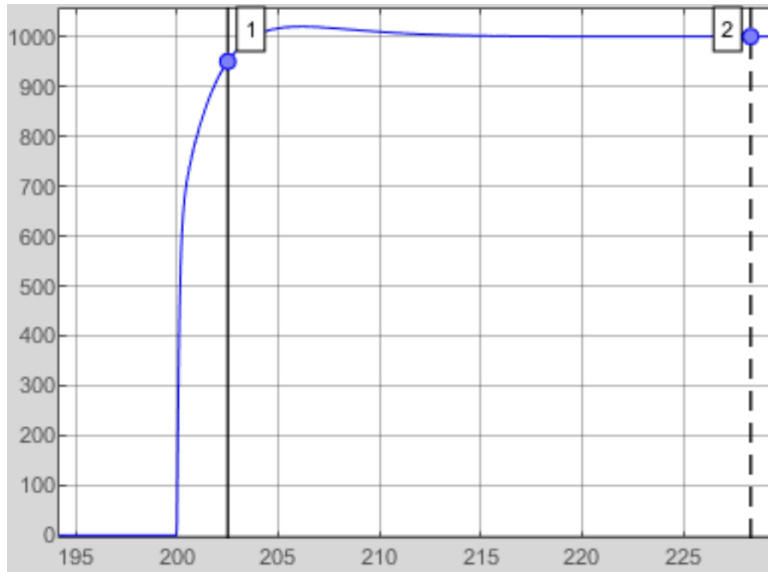


FIGURE 2.15 – Réponse du système en boucle fermée avec la loi de commande PI

Ces valeurs permettent alors d'obtenir un temps de réponse de  $T_{95\%} = 2.5s$  dans le cas d'utilisation de la boîte noire. Cette loi de commande permet donc d'obtenir une réponse très rapide du système, un dépassement moindre et une erreur de mesure nulle.

# Conclusion

L'objectif principal de ce projet était de mettre en place une loi de commande d'un petit turboréacteur, le DGEN 380. Cette loi de commande devait permettre de contrôler la vitesse de rotation de la turbine et de lier l'entrée en carburant pour obtenir la valeur désirée. Au cours de ce projet, nous avons pu nous familiariser avec les différents outils logiciels utilisés dans ce domaine, notamment *MATLAB*, *Simulink* et *Sisotools*. Nous avons appris à l'aide de ces logiciels à mettre en place la modélisation d'un système, à simuler ce système et à créer un loi de commande et un correcteur proportionnel et/ou intégral. Nous avons pu ainsi mettre en application la théorie vue en cours et en TD de *DSL*.