

TD16.21 – Précision et rapidité des SLCI

Simulateur de vol « Fly-ho »¹

Contexte



L'apprentissage du pilotage ou la qualification des pilotes sur un nouveau type d'appareil requiert de nombreuses heures de formation "en situation".

A cet effet, le simulateur de vol se substitue avantageusement au vol réel, tant au niveau du coût de la formation que de l'étendue des situations qui peuvent être reproduites en toute sécurité.

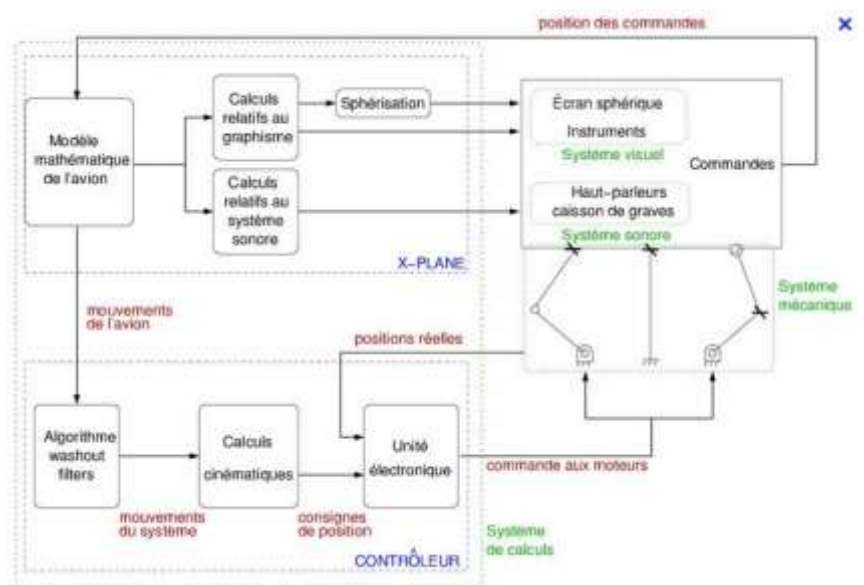
Dans un simulateur, le pilote est isolé du monde extérieur et perçoit uniquement les informations que le simulateur lui communique.

Pour donner la sensation au pilote qu'il est dans un avion réel, le simulateur agit sur **3 aspects** :

a) Donner une vue de l'extérieur qui est le résultat de la simulation de vol. Ce résultat est visualisé sur des écrans LCD censés représenter ce que l'on voit au travers des fenêtres du cockpit. Le cerveau du pilote perçoit au travers du système de vision les mouvements de l'avion. Il y a cependant deux lacunes à cette perception : elle est lente et ne permet pas de sentir physiquement les effets de l'accélération.

b) Faire subir au pilote les effets de l'accélération. Cette accélération est perçue par le système vestibulaire humain (cavité de l'oreille interne), un peu dans son intensité, mais surtout dans son orientation. Le simulateur devra donc s'orienter pour donner au pilote la sensation qu'il accélère.

c) La sonorisation reproduit exactement les bruits perçus dans le cockpit (bruit de moteur, bruit de l'air...).



¹ Adapté du sujet ICNA 2012

La cinématique des simulateurs les plus complets est basée sur un hexapode (ou plate-forme de Stewart) doté de 6 axes. Une solution moins coûteuse consiste à n'installer que 3 axes, de façon à ne reproduire que les mouvements principaux de l'avion : roulis, tangage et déplacement vertical.

C'est le principe du simulateur FLY-HO de la société 6mouv, support de ce sujet.

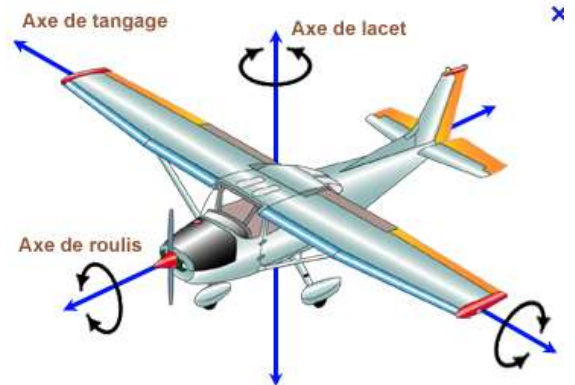
Le simulateur, constitué de 3 axes (*) M1, M2 et M3 d'architecture identique, ne nécessite qu'une alimentation électrique.

* Nota : on appelle « axe » un ensemble de composants associés à une mobilité du cockpit.

Etude des comportements attachés à la fonction « Reproduire les sensations d'un avion en vol »

Un extrait du CdCF du simulateur 3 axes « FLY-HO » est donné ci-dessous (performances générales) :

Critère	Niveau
Angles roulis et tangage du cockpit	+/- 0,35 rad (soit +/-20°)
Débattement vertical du cockpit	42 cm
Vitesses angulaires du cockpit	0,45 rad/s (soit 25°/s)
Vitesse verticale du cockpit	47 cm/s
Seuil de perception des accélérations	0,01 g



1. Evaluation des performances de l'asservissement en position des actionneurs

L'objectif de cette partie est de s'assurer que la partie opérative permettant de déplacer le simulateur est suffisamment rapide pour reproduire le comportement réel de l'avion.

La commande de chacun des actionneurs est identique. La boucle d'asservissement de position comporte une boucle interne d'asservissement de vitesse. Le schéma bloc de cet asservissement pour l'actionneur permettant le déplacement vertical est donné à la figure suivante.

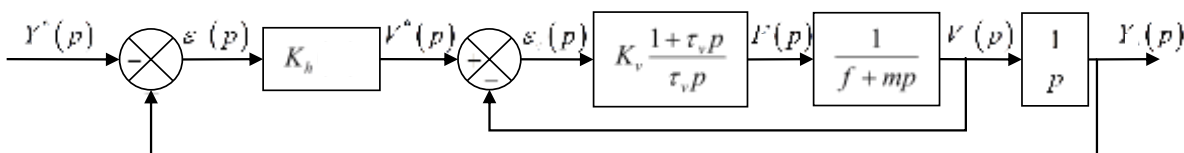


Schéma bloc du système d'asservissement de position

On note :

- p la variable de Laplace
- $Y^*(p)$ et $Y(p)$ respectivement la référence de position et la position mesurée du simulateur suivant l'axe vertical.
- $\varepsilon(p)$ l'écart sur la position
- K_h la transmittance du correcteur de position de type proportionnel
- $V^*(p)$ et $V(p)$ respectivement la référence de vitesse et la vitesse mesurée du simulateur suivant l'axe vertical.

- $\varepsilon_v(p)$ l'écart sur la vitesse
- $K_v \cdot \frac{1+\tau_v p}{\tau_v p}$ le correcteur de vitesse de type proportionnel-intégral
- $F(p)$ la force de l'actionneur agissant sur le cockpit du simulateur
- f et m respectivement le coefficient de frottement visqueux et la masse équivalente en translation suivant l'axe vertical.

Q1.1. Calculer $H_v(p)$ la fonction de transfert en poursuite de l'asservissement de la vitesse. Elle sera mise sous la forme canonique suivante $\frac{1+\tau_v p}{1+\frac{2\xi_1}{\omega_{p1}}p+\frac{p^2}{\omega_{p1}^2}}$ (préciser les expressions de ω_{p1} et ξ_1).

Q1.2. Calculer ensuite la fonction de transfert en boucle ouverte $H_{BO}(p)$ de l'ensemble de cet asservissement.

Pour la suite, les valeurs numériques des paramètres sont les suivantes : $\omega_{p1} = 3,5 \text{ rad/s}$ $\xi_1 = 0,6$

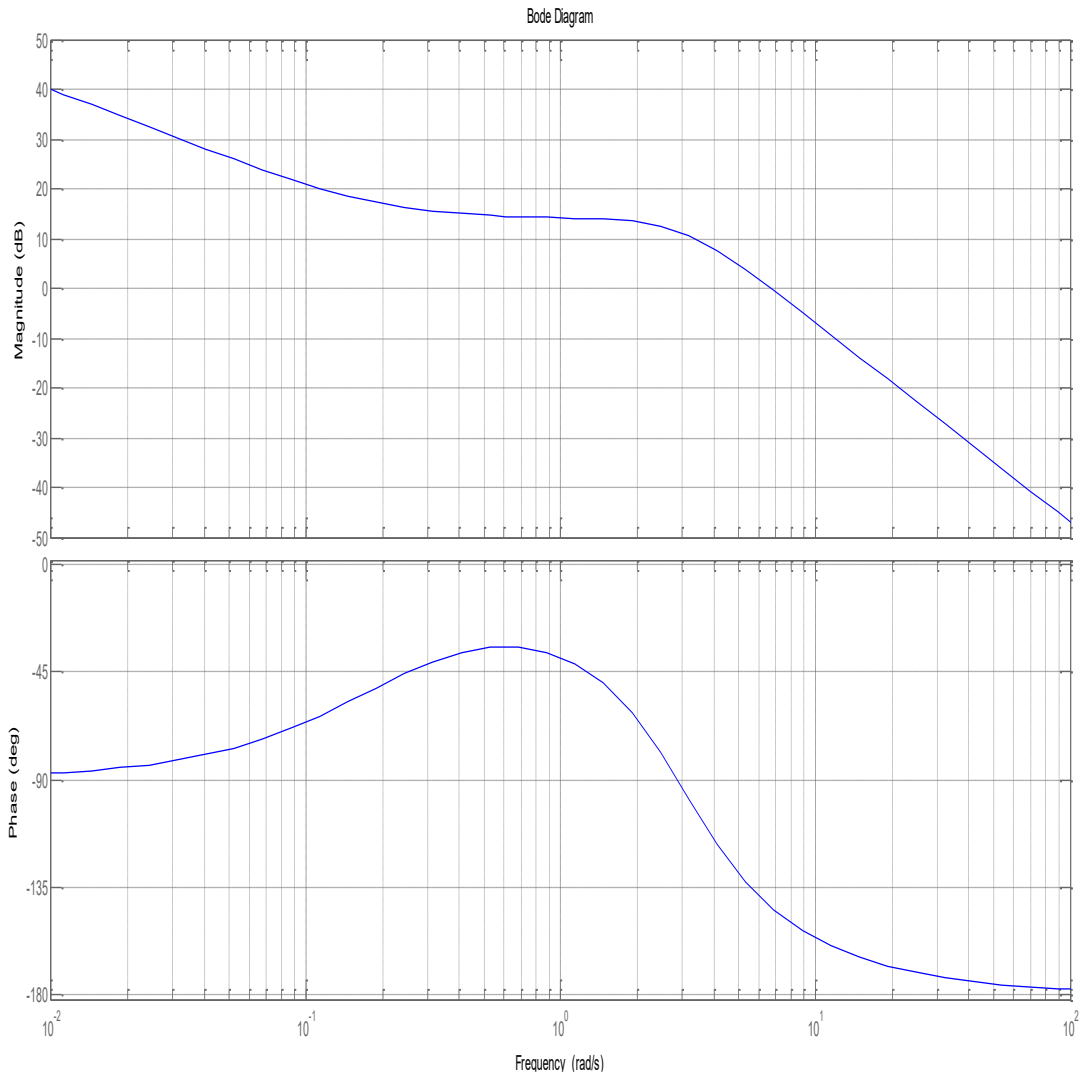
Par ailleurs, le cahier des charges concernant cet asservissement impose :

- une erreur de position nulle ;
- une erreur statique de traînage (pour une pente unité) inférieure à 0,01 ;
- une rapidité définie par une bande passante $\omega_u = 10 \text{ rad/s}$ (cela signifie que le gain de $H_{BO}(p)$ est l'unité pour ω_u ;
- une marge de phase d'au moins 45° .

Q1.3. Quel est l'effet de l'augmentation de la valeur de K_h sur les performances globales de l'asservissement de la position.

Q1.4. Déterminer la valeur extrême de K_h permettant d'obtenir l'erreur statique de traînée désirée.

Les diagrammes de Bode de $H_{BO}(p)$ sont tracés ci-dessous :



Q1.5. Indiquer quelle valeur de K_h a été choisie pour tracer ce diagramme. Déterminer la valeur de K_h permettant d'obtenir la pulsation désirée au gain unité. Cette valeur est-elle compatible avec celle de la question précédente ?

Q1.6. Quelle serait alors la marge de phase pour la valeur de K_h permettant de respecter le critère de rapidité ?

Pour remédier à ce problème une solution est de modifier le correcteur de façon à ce qu'il apporte de la phase à la pulsation ω_u . On parle de correcteur à avance de phase. Il sera abordé dans les cours et TD suivants.

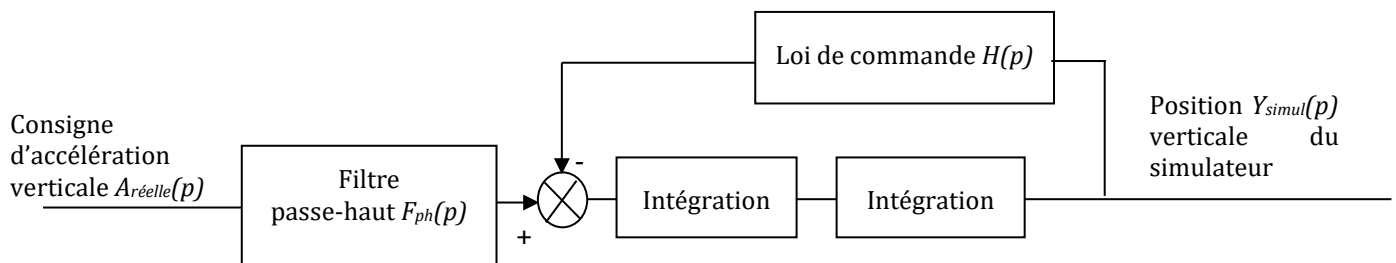
2. Etude du comportement aux chocs (turbulences atmosphériques, atterrissages durs)

En translation verticale, le simulateur doit être capable de reproduire des accélérations verticales transitoires pendant une fraction de seconde. Au-delà c'est le système de vision avec les écrans LCD qui prend le relais et fait percevoir au pilote les mouvements de l'avion.

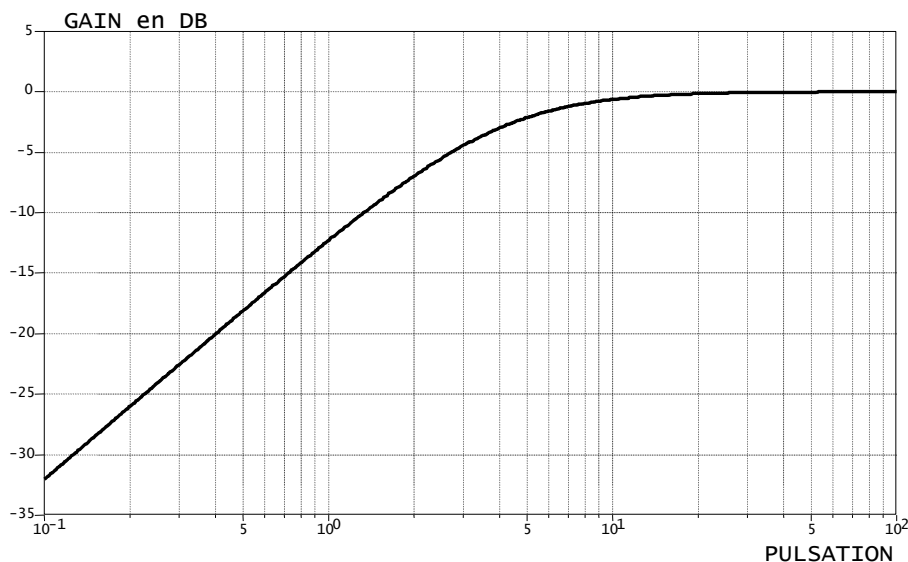
La réponse du simulateur est constituée :

- d'un filtre passe-haut pour conserver la capacité de simuler des variations d'accélérations verticales rapides (comme les chocs lors du roulage sur terrain irrégulier en herbe par exemple)
- d'une loi de commande qui réalise la fonction « d'oubli » et qui permet d'assurer le retour du simulateur vers sa position moyenne. Cette fonction doit être réalisée sans que le pilote ne s'en aperçoive, or les seuils de perception des récepteurs sensoriels humains (oreille interne principalement) sont **évalués à 0,01.g au maximum**.

Le schéma-bloc ci-dessous reproduit ce principe.



Q2.1. Le tracé du diagramme de Bode en gain du filtre passe-haut est représenté sur la figure ci-dessous. En déduire et justifier la forme de la fonction de transfert de $F_{ph}(p)$. Déterminer par lecture de la courbe, les valeurs du Gain statique et de la constante de temps.



La loi de commande du simulateur est de la forme $H(p) = 1 + Tp$.

Q2.2. Redessiner le schéma-bloc dans le domaine de Laplace et calculer l'expression de la fonction de transfert globale $Y_{simul}(p)/A_{réelle}(p)$.

Le cas dimensionnant du simulateur correspond à la restitution des sensations lors d'un échelon d'accélération d'amplitude 4 m/s^2 .

Q2.3. Déterminer l'expression de $Y_{simul}(p)$ en réponse à cette sollicitation. Vérifier que la loi de commande choisie permet bien d'assurer le retour du simulateur vers sa position moyenne.

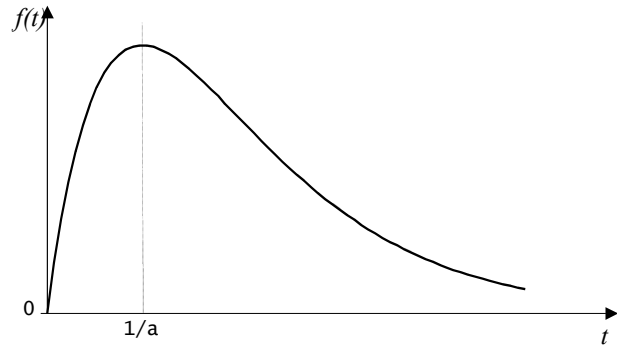
Afin de déterminer le déplacement vertical maximum du simulateur, la fonction de transfert $Y_{simul}(p)/A_{réelle}(p)$ doit être simplifiée. Pour une première étude approchée, on prendra $T = 2$ s.

Q2.4. Déterminer les pôles de la fonction $Y_{simul}(p)/A_{réelle}(p)$ et simplifier l'expression de cette fonction en conservant uniquement les pôles dominants. En déduire l'expression de $Y_{simul}(p)$ en réponse à la sollicitation en échelon d'accélération d'amplitude 4 m/s^2 .

On a :

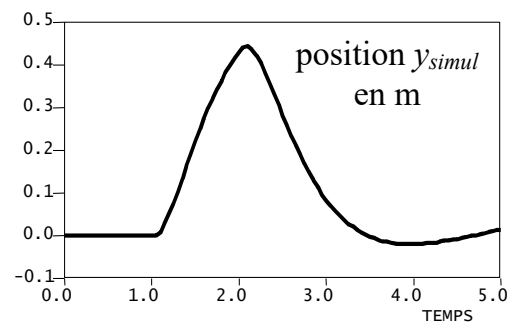
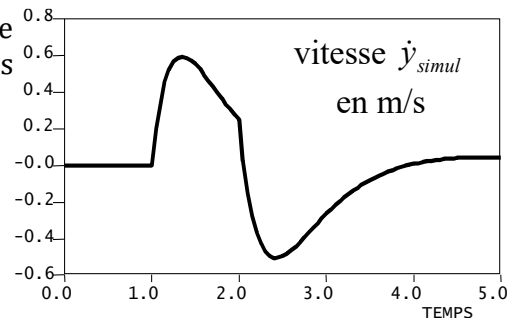
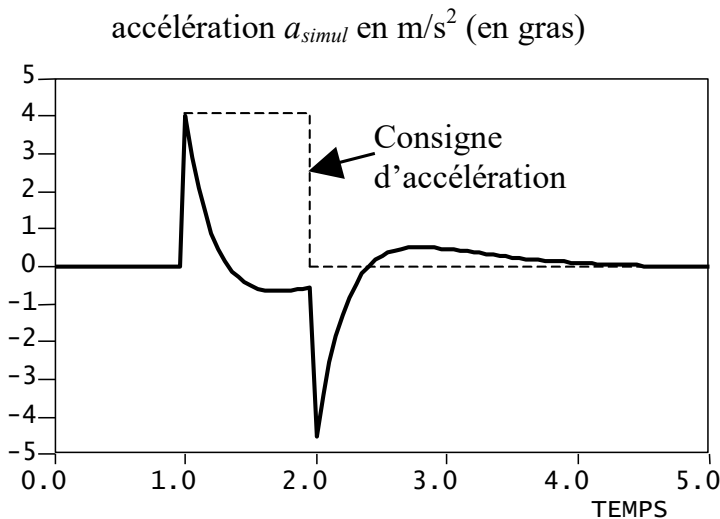
$$\mathcal{L}^{-1} \left[\frac{1}{(p + a)^2} \right] = te^{-at} \cdot u(t)$$

La courbe $f(t) = te^{-at} \cdot u(t)$ est tracée ci-contre.



Q2.5. Déterminer la valeur du déplacement vertical maximum du simulateur y_{max} et sa vitesse maximale \dot{y}_{max} . Conclure vis-à-vis du cahier des charges.

Malheureusement, ce modèle simplifié ne permet pas de représenter correctement l'accélération. La figure ci-dessous représente les courbes de réponse du système complet :



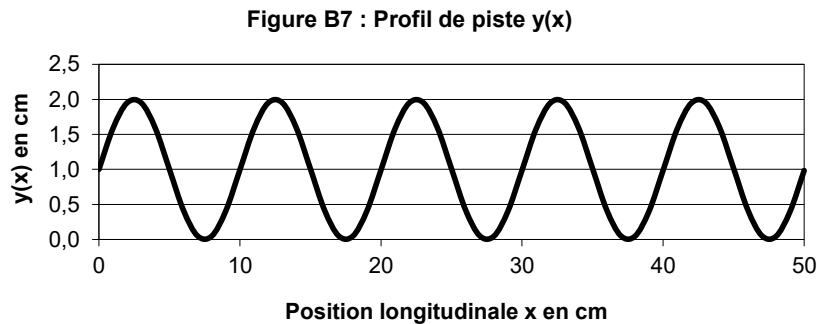
Q2.6. Commenter les courbes de la figure ci-dessus vis à vis des critères du CDCF, en particulier vis à vis du seuil de perception des accélérations lors de la phase de retour en position moyenne.

Q2.7. En conservant la forme de $H(p) = 1 + Tp$ et en faisant l'analogie avec la réponse d'un système du second ordre, indiquer dans quel sens faire varier T pour respecter le seuil de perception de l'accélération pendant la phase de retour en position moyenne.

3. Etude de la réponse aux irrégularités de piste lors du roulage

Les pistes à travers le monde sont de qualités variables. Outre l'effet de l'accélération longitudinale, le simulateur doit aussi reproduire les accélérations verticales causées par les irrégularités du terrain. Le cahier des charges impose qu'elles soient ressenties à partir d'une vitesse de 0,2 km/h.

Le profil de la piste est supposé constitué de bosses de 2 cm régulièrement espacées de 10 cm que l'on peut modéliser par le profil sinusoïdal suivant :



Q3.1. Exprimer le déplacement vertical $y(x)$ en fonction de la position longitudinale x de l'avion sur la piste. En déduire l'expression $y(t)$ du déplacement vertical en fonction du temps lorsque l'avion se déplace à la vitesse constante V . En déduire l'accélération verticale générée $a_{réelle} = \ddot{y}(t) = a_0 \sin(\omega t)$ et exprimer a_0 et ω en fonction de V .

Q3.2. Calculer la vitesse V_{min} de l'avion correspondant au seuil de perception de l'accélération $|a_0|$. Conclure.

On supposera que la fonction de transfert du simulateur suivant l'axe vertical est de la forme :

$$\frac{Y_{simul}(p)}{A_{réelle}(p)} = \frac{p}{(p+4)(p+1)^2}$$

Q3.3. Après avoir exprimé la fonction de transfert en accélération du simulateur $A_{simul}(p)/A_{réelle}(p)$, tracer le diagramme asymptotique de Bode (gain et phase) de cette fonction de transfert. Préciser les valeurs du gain en dB aux différents points de cassure du diagramme de gain.

On considérera que l'accélération est correctement restituée par le simulateur si l'atténuation entre l'accélération simulée et l'accélération réelle est inférieure à 3dB.

Q3.4. Déterminer à partir de quelle vitesse V_{3dB} de l'avion, les accélérations dues aux irrégularités de la piste sont restituées correctement et vérifier que à cette vitesse les accélérations sont effectivement ressenties par le pilote.

Q3.5. Après avoir tracé le diagramme asymptotique de Bode de $Y_{simul}(p)/Y_{réelle}(p)$, vérifier que le déplacement vertical du simulateur est réalisable dans toute la plage de vitesse de V_{min} à V_{max} (vitesse décollage supérieure à 300 km/h).