

Complément sur l'Amplificateur Opérationnel

- **Bande passante**
- **Slew rate**

© Fabrice Sincère
Version 1.2

Sommaire

- Introduction
- 1- Mise en évidence de la bande passante de l'A.O.
Exemple en régime linéaire avec le montage “amplificateur non inverseur”
 - 1-1- Réponse à un signal d'entrée en forme de créneau
 - 1-2- Réponse à un signal d'entrée de forme sinusoïdale
- 2- Fonction de transfert d'un A.O.
 - 2- 1- Fonction de transfert d'un A.O. en boucle ouverte
 - 2-2- Fonction de transfert en boucle fermée
 - 2-2-1- Exemple du montage amplificateur non inverseur
 - 2-2-2- Généralisation

- 3- Le slew rate (SR)
- 4- L'A.O. en commutation
 - 4-1- Montage comparateur à un seuil
 - 4-2- Montage trigger
- 5- Simulation avec Matlab/Simulink
- Conclusion
- Bibliographie
- Exercices
- Annexe A : Calcul de la durée de commutation du montage comparateur à un seuil
- Annexe B : Complément sur la commutation du montage trigger

Introduction

Jusqu'à présent, nous avons considéré l'A.O. comme parfait.

En vérité, l'A.O. possède un certain nombre de défauts dont voici une liste non exhaustive :

- tension d'offset
- courants d'entrée
- impédances d'entrées et de sortie
- bande passante
- slew rate
- réjection de mode commun

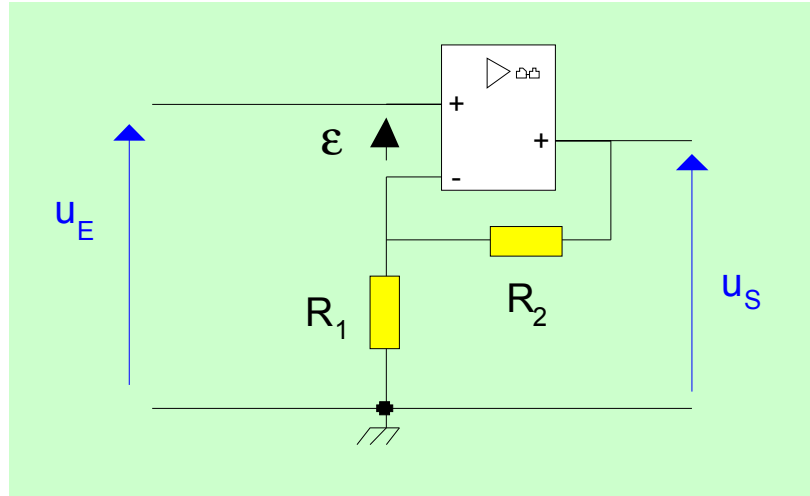
Nous ne nous intéresserons ici qu'à la bande passante (et donc à la réponse en fréquence) et au "slew rate".

Nous continuerons à considérer l'A.O. parfait en terme d'impédances, c'est-à-dire :

- impédances d'entrées nulles (courants d'entrées nuls)
- impédance de sortie nulle (tension de sortie indépendante du courant de sortie)

1- Mise en évidence de la bande passante de l'A.O.

Exemple en régime linéaire avec le montage “amplificateur non inverseur”



$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 100 \text{ k}\Omega$$

TL071

$$V_{cc\pm} = \pm 15 \text{ V}$$

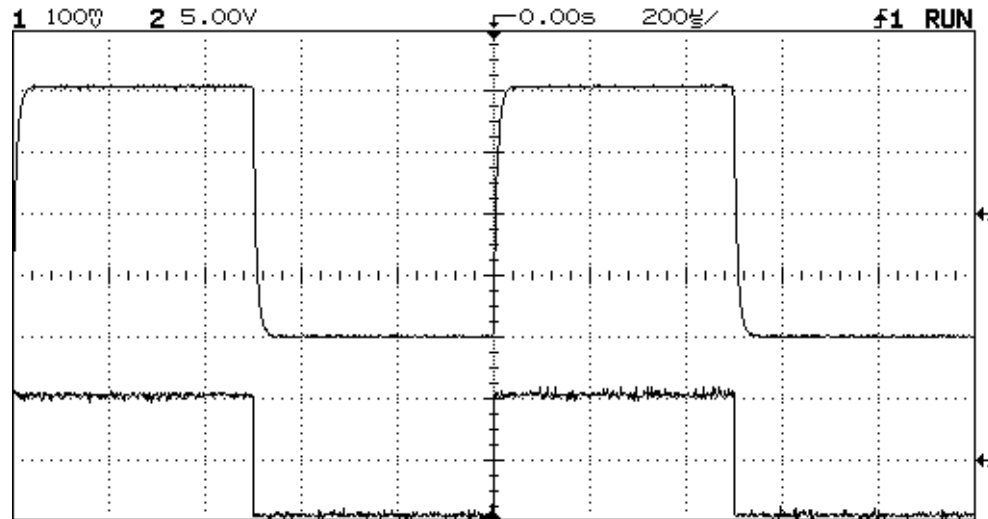
On considérant l'A.O. parfait, nous savons que la fonction de transfert du montage s'écrit :

$$\underline{T} = \frac{\underline{U}_S}{\underline{U}_E} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (1)$$

L'amplification en « boucle fermée » est : $A = 1 + \frac{100}{1} = 101$

1-1- Réponse à un signal d'entrée en forme de créneau

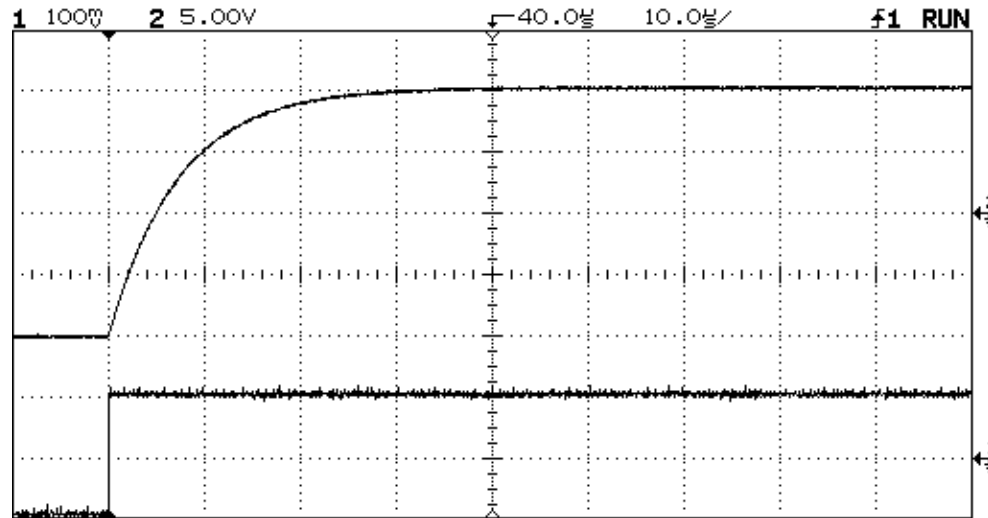
- Appliquons en entrée un créneau ± 100 mV de fréquence 1 kHz :



La sortie (voie 2) a une amplitude ± 10 V ce qui correspond bien à une amplification de 101.

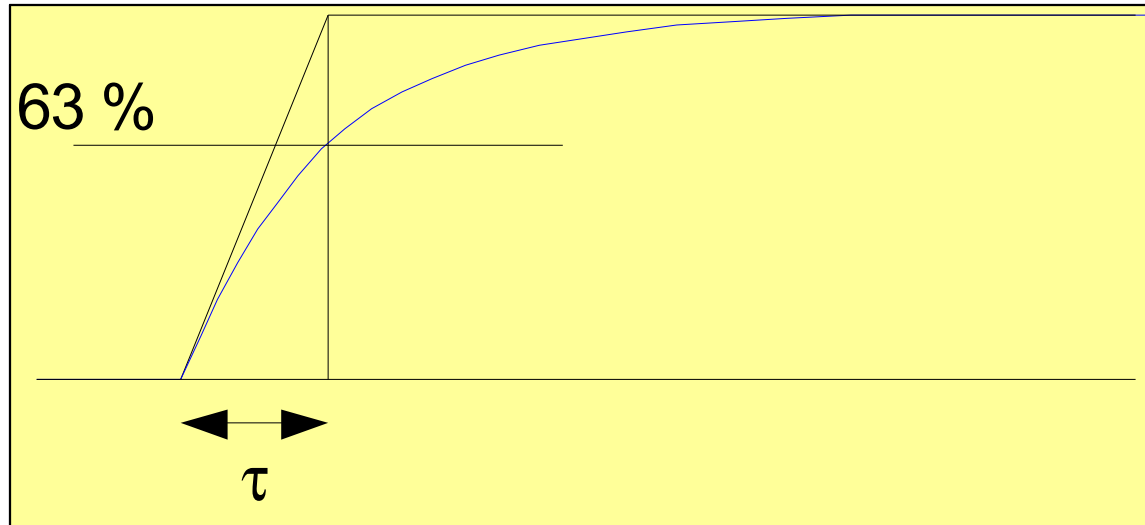
On notera cependant que la sortie n'est pas exactement la forme d'un créneau : c'est là une des conséquences de la bande passante limitée de l'A.O.

Regardons de plus près en modifiant la base de temps de l'oscilloscope :



La sortie est en “retard” sur l’entrée.

On peut quantifier ce retard avec τ la “*constante de temps*” du montage que l’on mesure, ici, de la manière suivante :

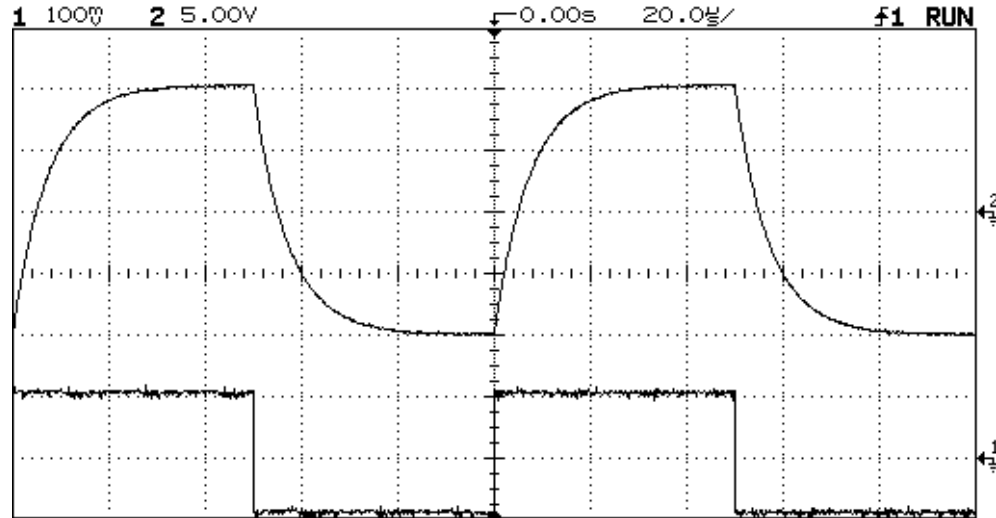


$$\tau \approx 7 \mu\text{s}$$

Le “*temps de réponse à 95 %*” est donné par :

$$3\tau \approx 21 \mu\text{s}$$

- Augmentons la fréquence à 10 kHz :

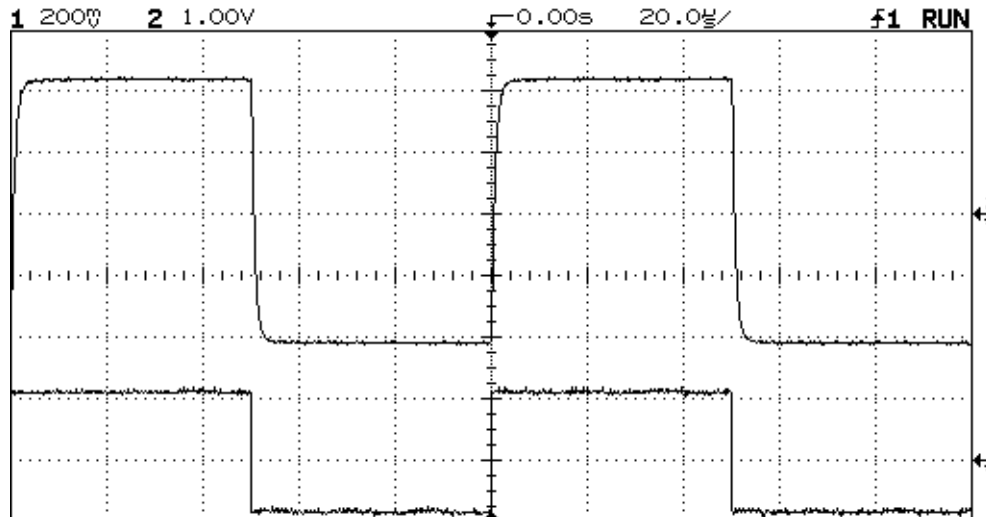


On remarque que la constante de temps est exactement la même ($\tau \approx 7 \mu\text{s}$).
Mais comme la période est plus petite, le signal de sortie s'écarte de la forme d'un créneau.

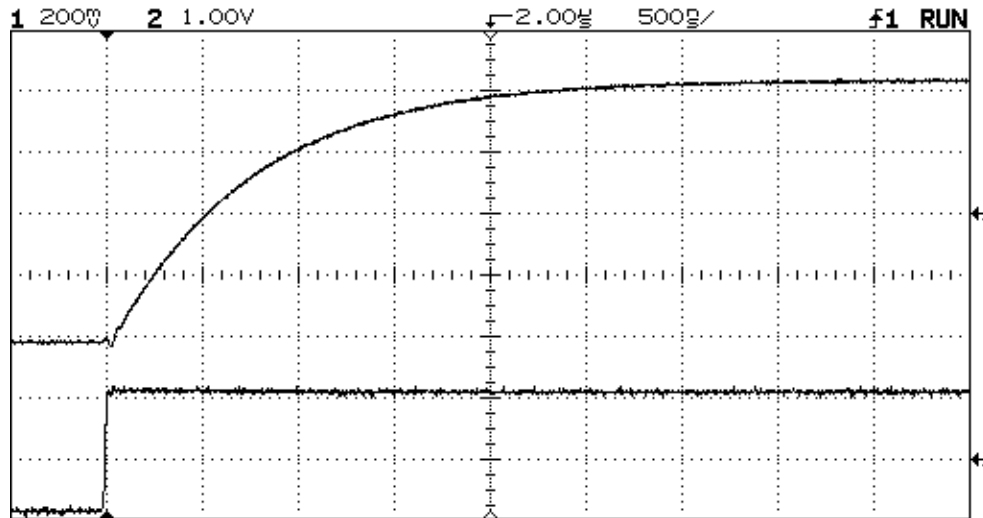
- Modifions la résistance R_2 : $10 \text{ k}\Omega$

$$\Rightarrow \text{Amplification en boucle fermée : } A = 1 + \frac{10}{1} = 11$$

Avec en entrée un créneau $\pm 200 \text{ mV}$ de fréquence 10 kHz , on obtient en sortie :

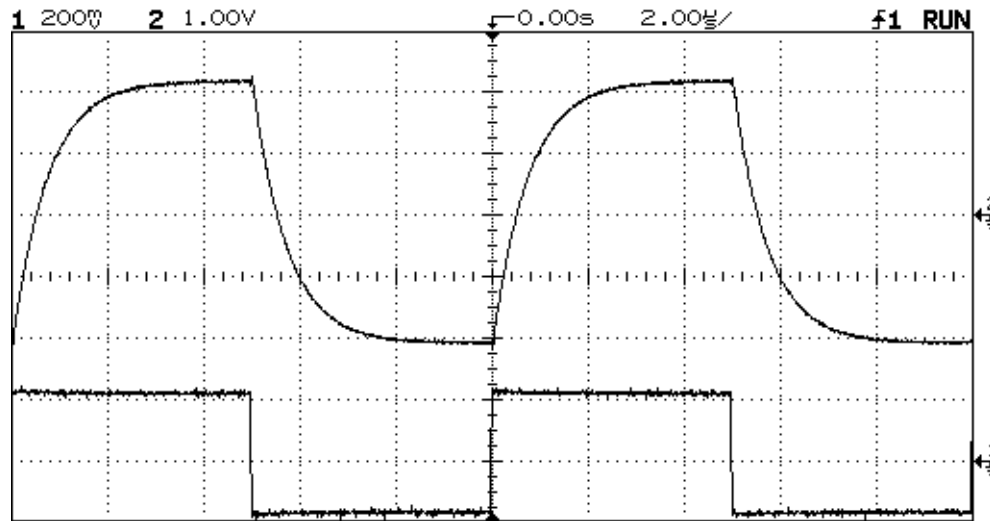


La constante de temps est : $\tau \approx 0,8 \mu\text{s}$



La constante de temps est environ 10 fois plus petite que précédemment, le montage est donc plus « rapide ».

A la fréquence $f = 100 \text{ kHz}$:



La constante de temps est toujours $\tau \approx 0,8 \mu\text{s}$.

En résumé :

La constante de temps est indépendante de la fréquence du signal d'entrée.

Quand l'amplification en boucle fermée diminue :

- la constante de temps diminue*
- le temps de réponse diminue*
- la rapidité augmente*

1-2- Réponse à un signal d'entrée de forme sinusoïdale

Appliquons maintenant en entrée une tension sinusoïdale.

En “basse” fréquence, la sortie est en phase avec l'entrée.

L'amplification est égale à : $1 + R_2/R_1$

Tout est conforme à l'équation (1) :

$$\underline{T} = \frac{\underline{U}_S}{\underline{U}_E} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (1)$$

En augmentant la fréquence, on constate :

- qu'un déphasage apparaît
- que l'amplification diminue

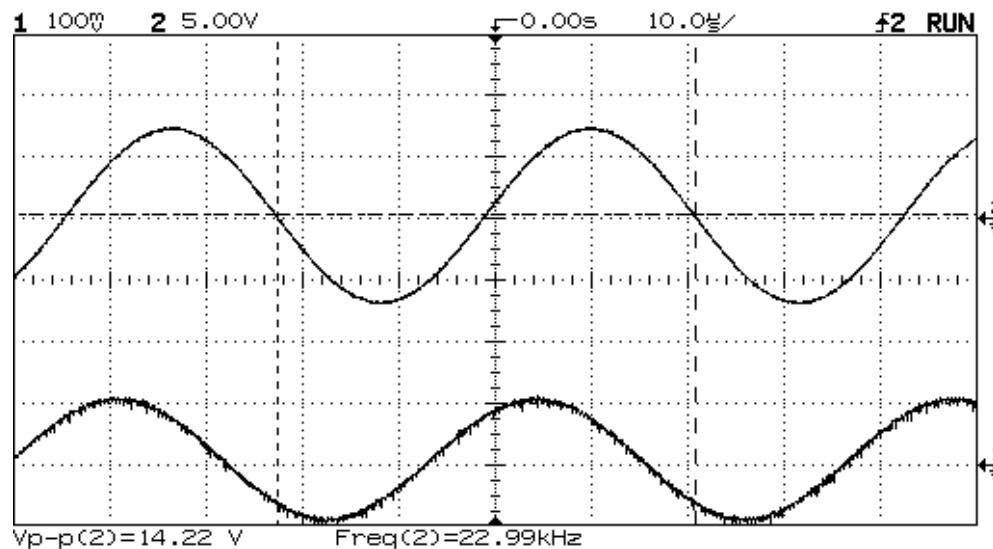
Le montage se comporte comme un filtre passe-bas.

$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 100 \text{ k}\Omega$$

$$\text{TL071 } V_{CC\pm} = \pm 15 \text{ V}$$

A la fréquence de coupure à -3 dB (donc pour une amplification égale à $A / \sqrt{2} = 71$) :

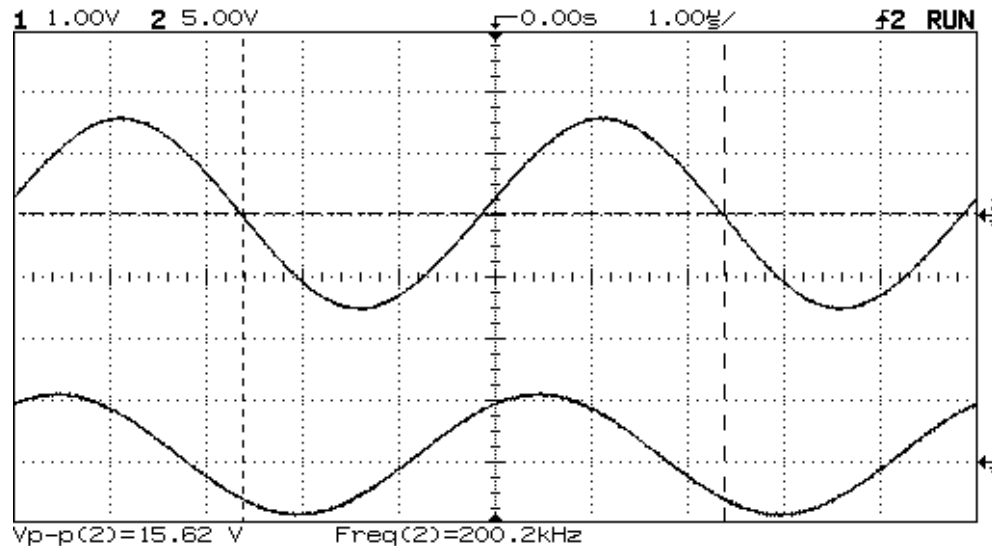


$$f_c \approx 23 \text{ kHz}$$

$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$\text{TL071 } V_{CC\pm} = \pm 15 \text{ V}$$



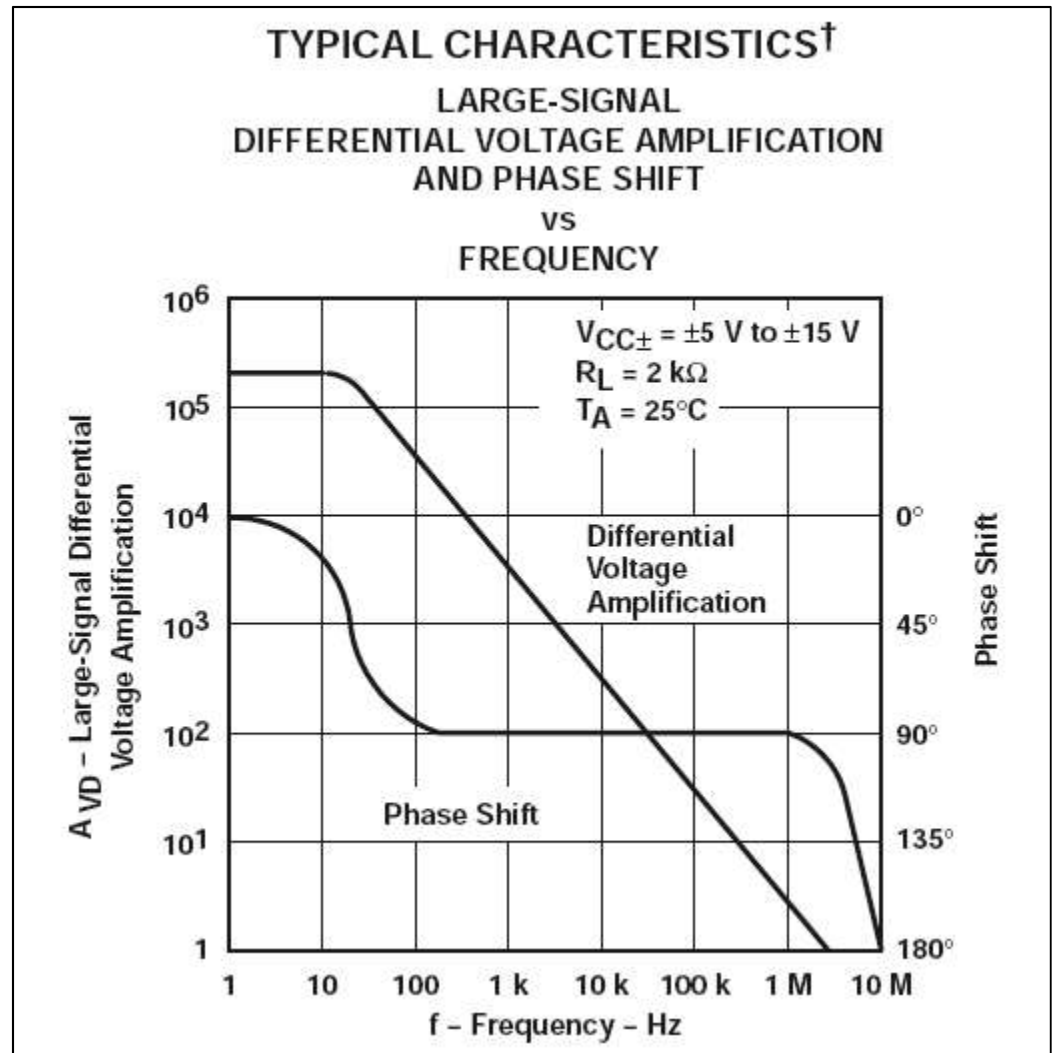
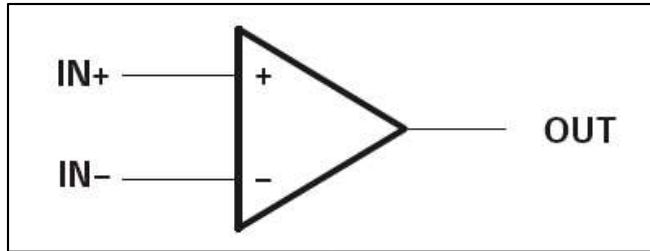
$$f_c \approx 200 \text{ kHz}$$

La fréquence de coupure augmente quand l'amplification en boucle fermée diminue.

2- Fonction de transfert d'un A.O

2- 1- Fonction de transfert d'un A.O. en "boucle ouverte"

Voici un extrait du datasheet du TL071 :



On reconnaît la caractéristique d'un amplificateur sélectif de type passe-bas, avec :

- amplification différentielle maximale (en boucle ouverte) :

$$A_o = 200\ 000$$

gain correspondant : $20 \log (200\ 000) = 106 \text{ dB}$

- fréquence de coupure à - 3 dB : $f_o = 15 \text{ Hz}$

- bande passante à - 3 dB : 0 à 15 Hz

- pente de - 20 dB/décade (caractéristique d'un système du 1er ordre)

On modélise la fonction de transfert de l'A.O. par :

$$\underline{T} = \frac{\underline{V}_s}{\underline{V}_+ - \underline{V}_-} = \frac{\underline{V}_s}{\underline{\varepsilon}} = \frac{A_o}{1 + j \frac{\omega}{\omega_o}}$$

$\omega_o = 2\pi f_o =$ pulsation de coupure à - 3dB (en rad / s)

2-2- Fonction de transfert en boucle fermée

2-2-1- Exemple du montage amplificateur non inverseur

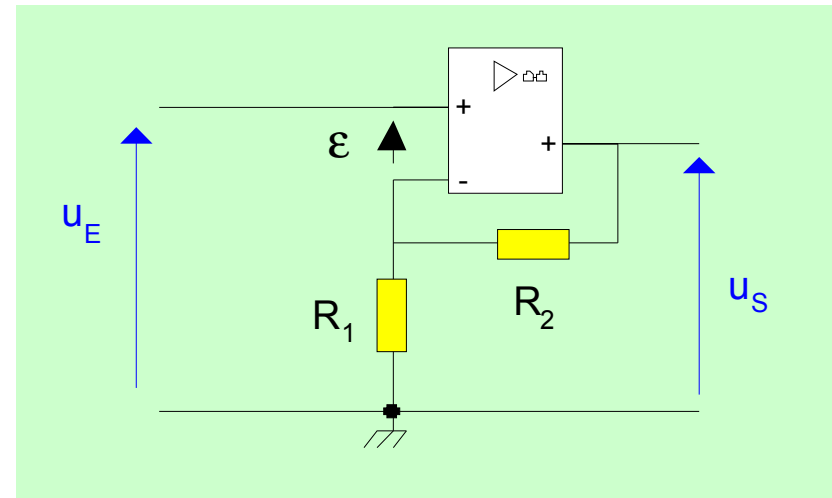
$$(1) \frac{\underline{U}_s}{\underline{\varepsilon}} = \frac{A_o}{1 + j \frac{\omega}{\omega_o}}$$

$$(2) \underline{\varepsilon} = \underline{V}_+ - \underline{V}_-$$

$$(3) \underline{V}_+ = \underline{U}_E$$

$$(4) \underline{V}_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \underline{U}_s = \frac{\underline{U}_s}{A}$$

$$\Rightarrow \underline{T} = \frac{\underline{U}_s}{\underline{U}_E} = \frac{\frac{A_o}{1 + \frac{A_o}{A}}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_o \left(1 + \frac{A_o}{A} \right)}}$$



En pratique : $A \ll A_0$

$$\Rightarrow \underline{T} = \frac{\underline{U}_S}{\underline{U}_E} \approx \frac{A}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0 \left(\frac{A_0}{A} \right)}}$$

D'où:

- Amplification en boucle fermée :

$$A \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

- Fréquence de coupure en boucle fermée :

$$f_c \approx f_0 \left(\frac{A_0}{A} \right)$$

2-2-2- Généralisation

- L'amplification en boucle fermée ne dépend pas de l'A.O.

(Elle se calcule donc facilement en considérant l'A.O. parfait).

- Le produit *Amplification en boucle fermée* \times *fréquence de coupure en boucle fermée* est souvent noté B_1 (unity-gain bandwidth)

- B_1 est constante et ne dépend que de l'A.O. :

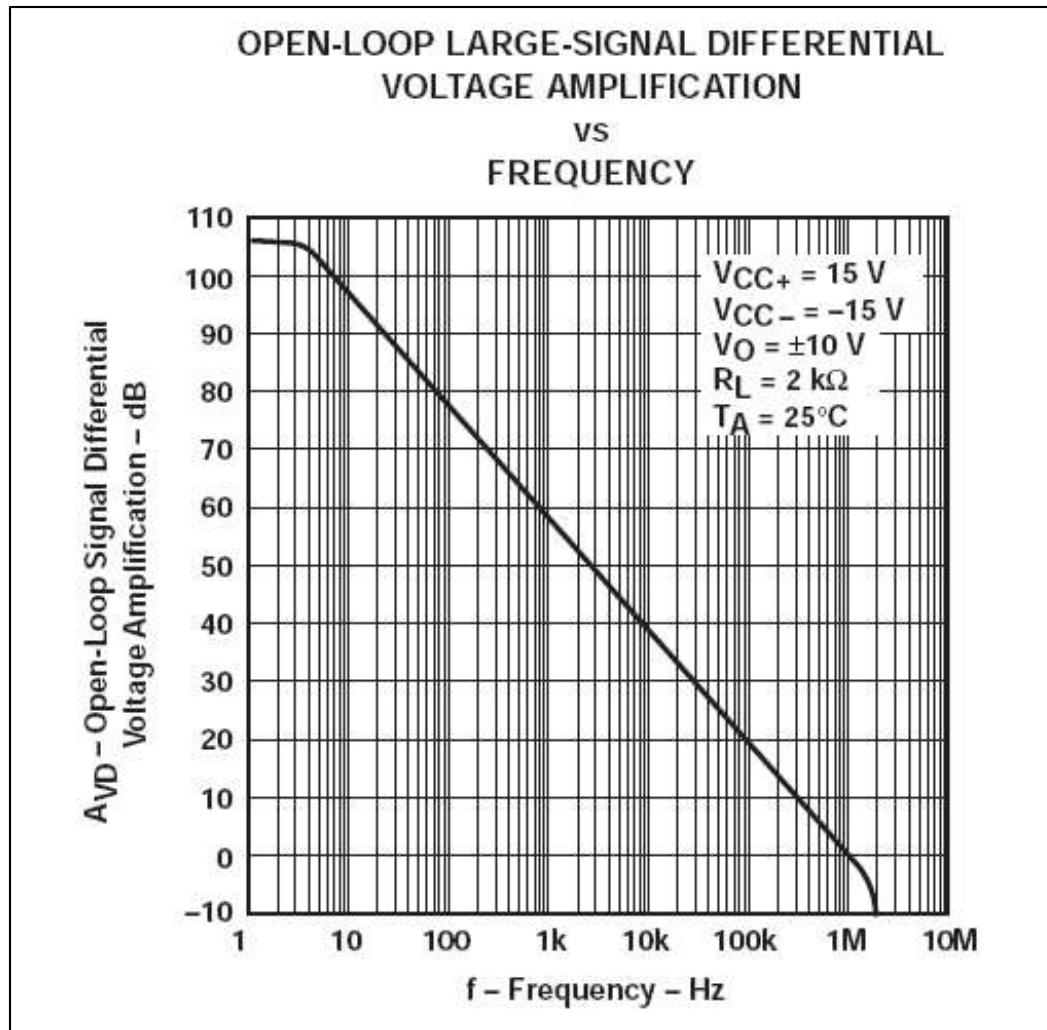
$$B_1 \approx Af_c \approx A_o f_o$$

$$f_c = \frac{B_1}{A}$$

Cette valeur est donnée dans le datasheet :

- Pour le TL 071 : $B_1 = 3 \text{ MHz}$

- Pour le $\mu A741$, une lecture graphique donne $B_1 = 1 \text{ MHz}$:



De plus, la fréquence de coupure à - 3dB est 5 Hz
et $A_0 = 200\,000$ (106 dB)

- Comparaison théorie / expérience (TL071)

A	fc expérimentale	fc théorique
11	200 kHz	270 kHz
101	23 kHz	29 kHz

- Constante de temps

La théorie indique que pour un filtre passe-bas du premier ordre :

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_c}$$

$$\Rightarrow \tau = \frac{A}{2\pi B_1}$$

La constante de temps est proportionnelle à l'amplification en boucle fermée, comme nous l'avons observé expérimentalement :

A	τ exp.	τ th.
11	0,8 μ s	0,58 μ s
101	7 μ s	5,4 μ s

3- Le slew rate (SR)

- Le slew rate correspond à la pente maximale que peut prendre le signal de sortie.

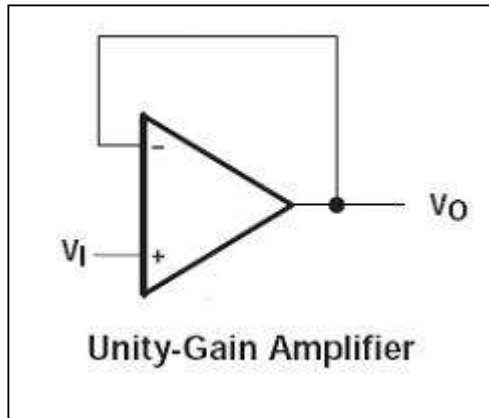
$$SR = \left| \frac{\Delta v_s}{\Delta t} \right|_{\max}$$

TL071 : SR = 13 V/ μ s (typique)

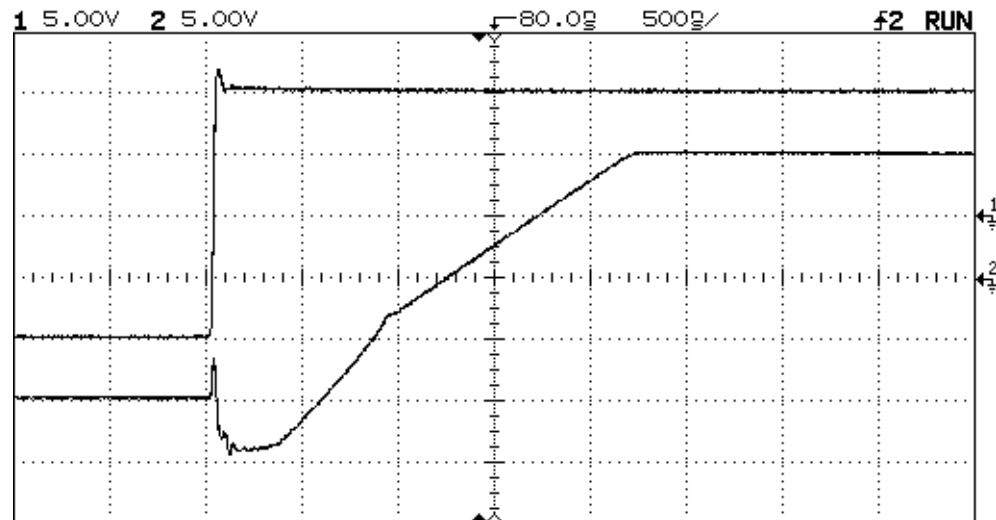
μ A741 : SR = 0,5 V/ μ s (typique)

(d'après datasheet)

- Le slew rate se mesure souvent en appliquant à l'entrée de l'A.O. câblé en montage suiveur, un échelon de tension de grande amplitude :

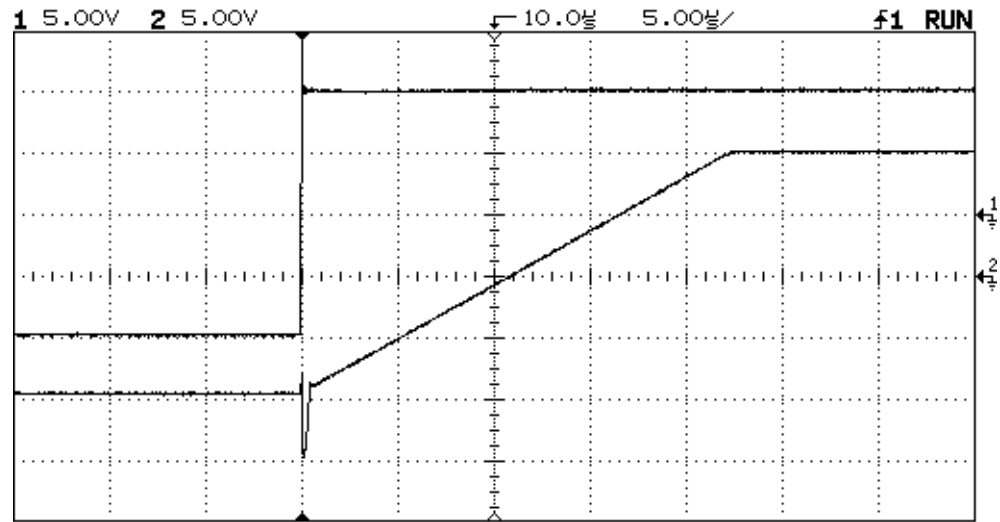


TL071 $V_{CC\pm} = \pm 15\text{ V}$



On mesure 11 V/ μ s pour un TL071.

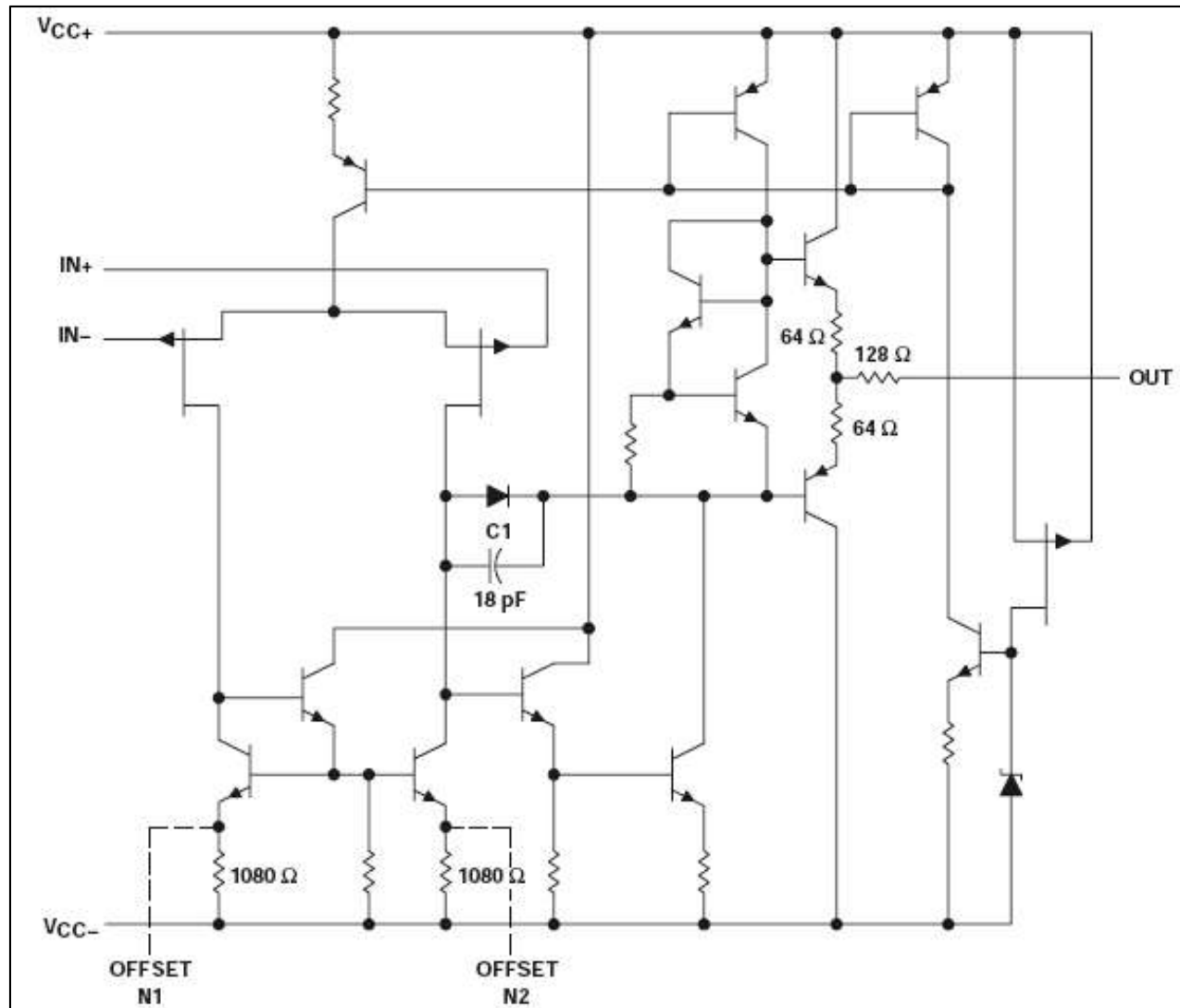
$\mu\text{A}741$ $V_{CC\pm} = \pm 15 \text{ V}$



On mesure $0,85 \text{ V}/\mu\text{s}$ pour un $\mu\text{A}741$.

- Origine du slew rate

Schéma interne du TL071 :



On remarque la présence du condensateur C_1 (18 pF).

Ce condensateur permet de faire “une compensation interne de fréquence” (les automaticiens parlent de correction).

Ceci assure la stabilité de l’A.O. pour toutes les fréquences.

En revanche, cela limite la pente de la tension de sortie (car C_1 se charge à courant constant) : c’est le slew rate.

- Soit un signal de sortie sinusoïdal de fréquence f et d'amplitude crête à crête $V_{S\ p-p}$ (peak-to-peak)

La pente maximale de ce signal (en V/s) est : $\pi f V_{S\ p-p}$

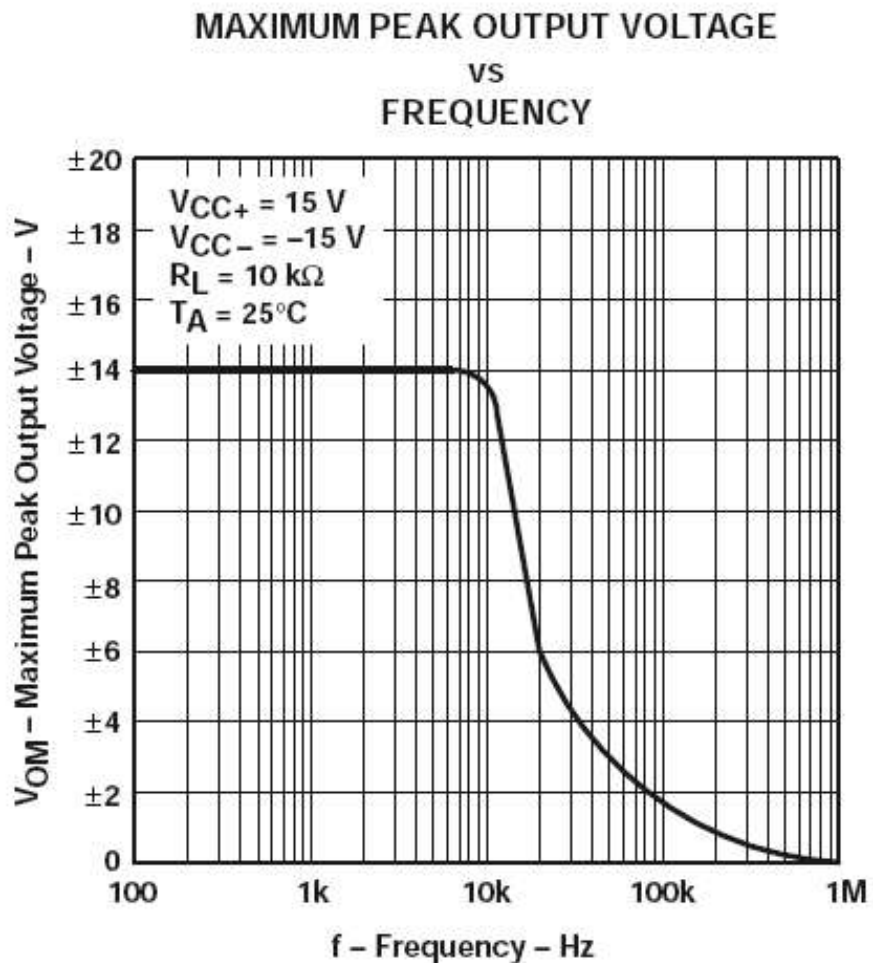
Le slew rate (SR) se manifeste si : $\pi f V_{S\ p-p} > SR$

Pour ne pas avoir de slew rate, il faut que l'amplitude du signal de sortie soit inférieure à :

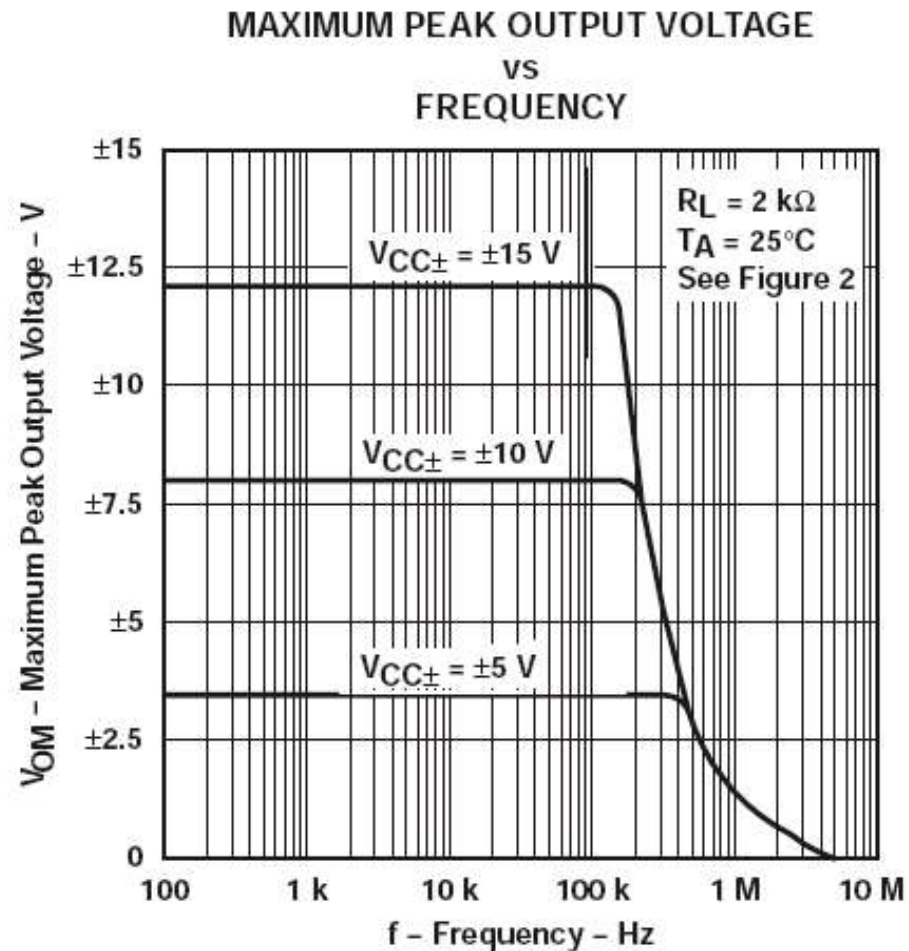
$$V_{S\ p-p} < \frac{SR}{\pi f}$$

C'est ce qu'indique le datasheet :

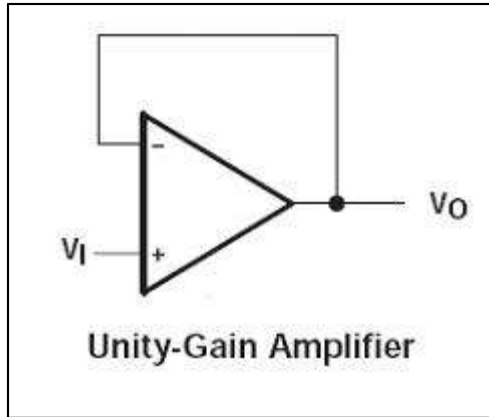
μ A741 :



TL 071 :



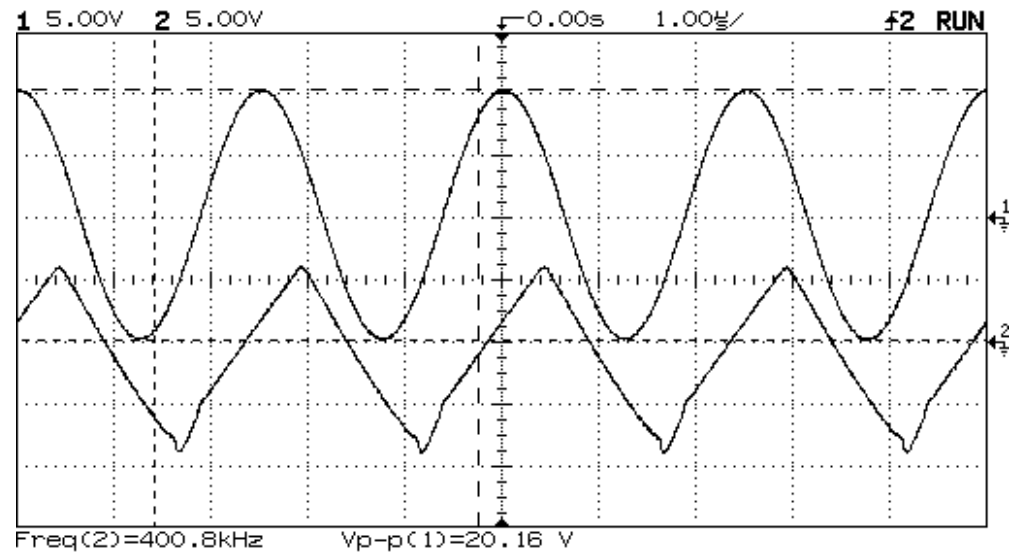
- Mise en évidence expérimentale du slew rate



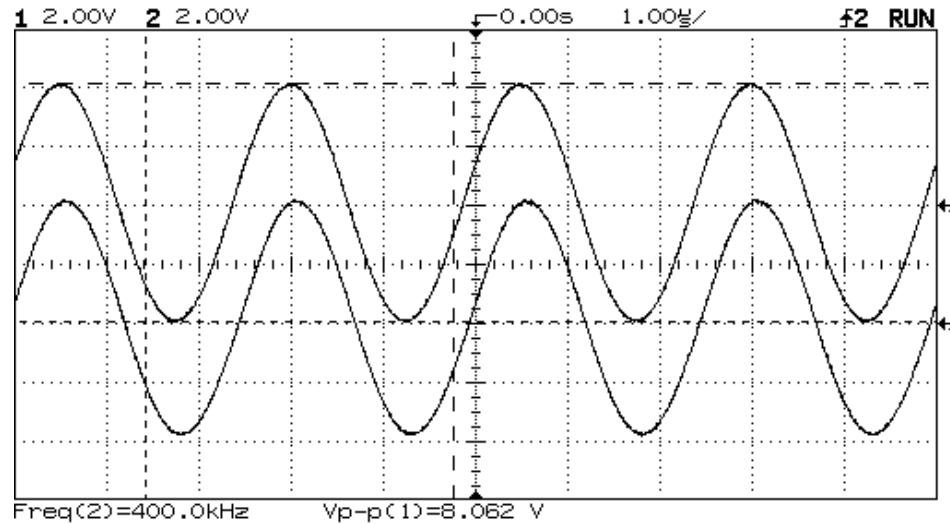
TL071 en suiveur

$V_{CC\pm} = \pm 15 \text{ V}$

Avec en entrée, un sinus de fréquence 400 kHz et d'amplitude $\pm 10 \text{ V}$:



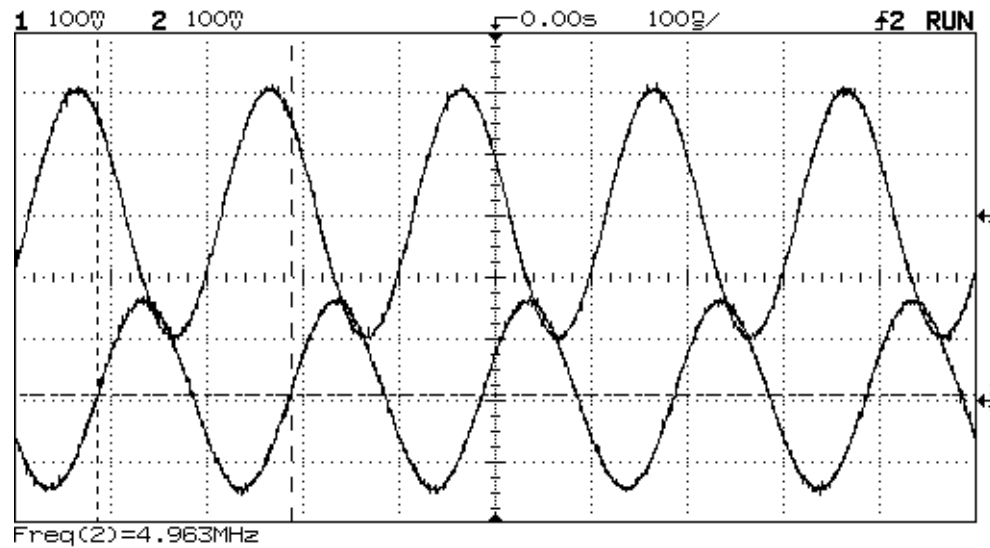
Le slew rate disparaît si on diminue l'amplitude du signal d'entrée :



Le slew rate est un phénomène non linéaire qui provoque la distorsion du signal de sortie.

Remarque :

Le suiveur a une fréquence de coupure de 5 MHz (3 MHz d'après le datasheet) :



- Considérons maintenant un signal carré d'amplitude crête à crête $V_{S\ p-p}$:

La pente maximale en sortie est donnée par :

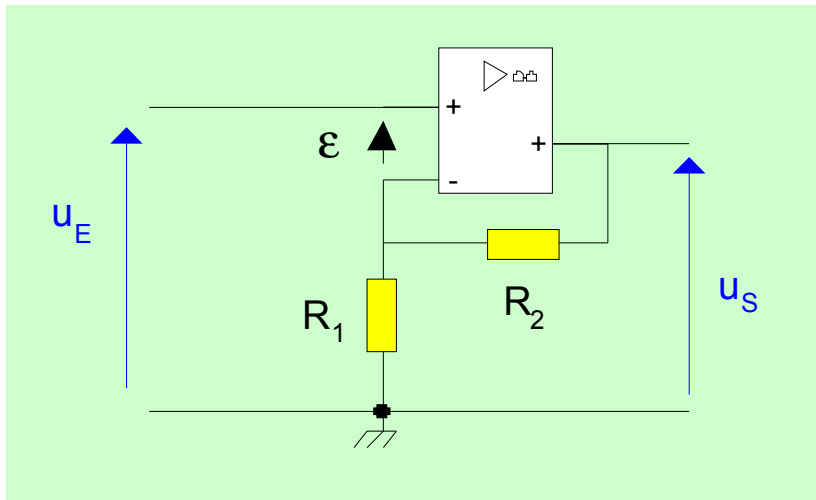
$$\frac{V_{S\ p-p}}{\tau} = V_{S\ p-p} \cdot 2\pi f_C = V_{S\ p-p} \frac{2\pi B_1}{A}$$

Le slew rate apparaît quand :

$$\boxed{V_{S\ p-p} > A \frac{SR}{2\pi B_1}} \quad \text{ou} \quad \boxed{V_{E\ p-p} > \frac{SR}{2\pi B_1}}$$

A.N. TL071

$$V_{E\ p-p} > \frac{13 \cdot 10^6}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^6} = 700 \text{ mV}$$



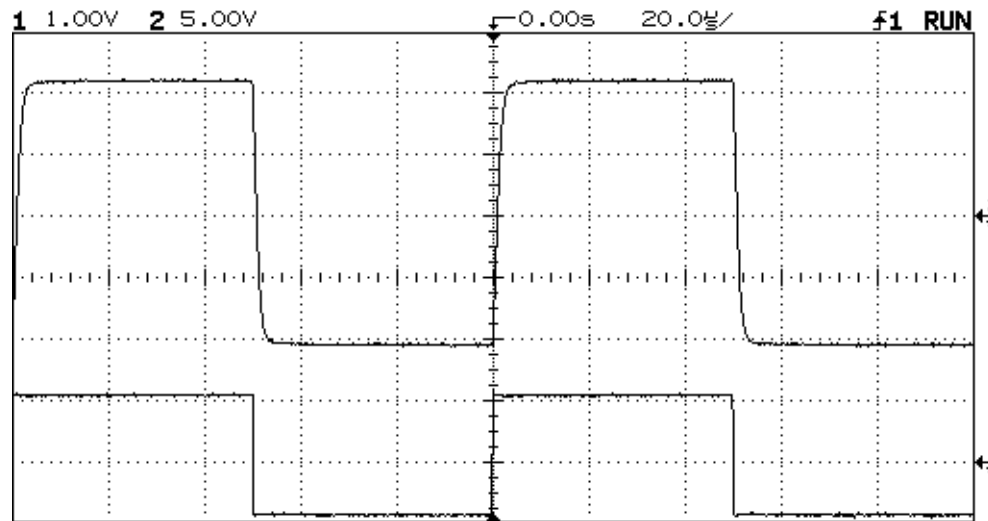
amplificateur non inverseur

$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$

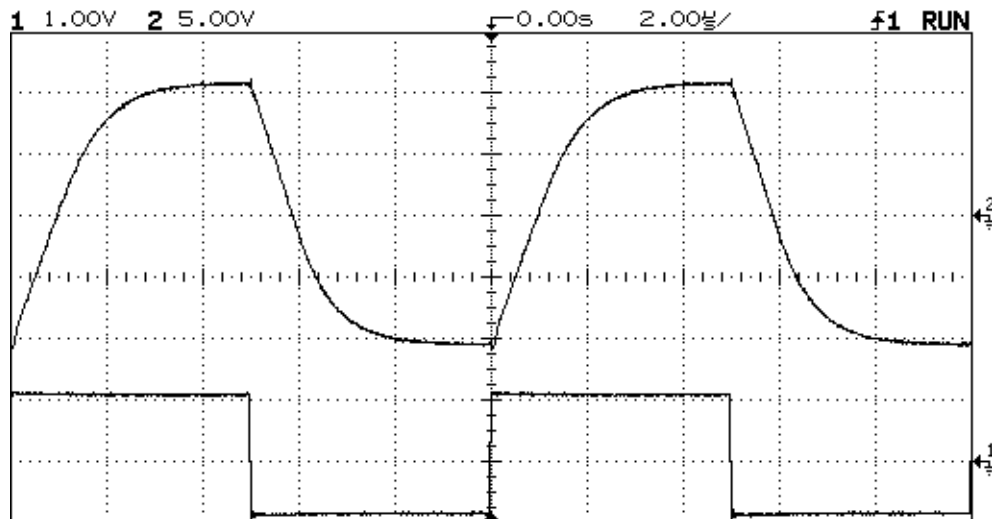
$$R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$\text{TL071 } V_{CC\pm} = \pm 15 \text{ V}$$

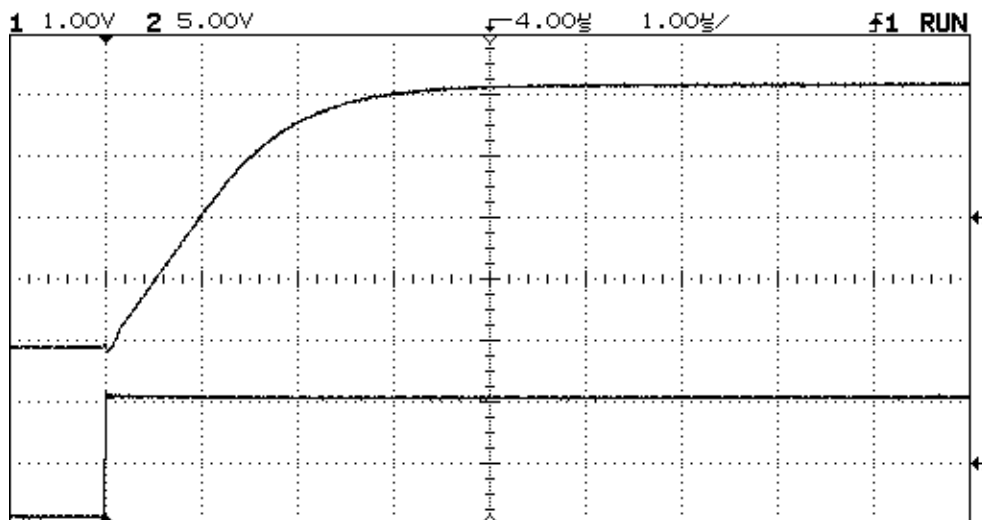
En entrée, signal de 10 kHz et d'amplitude $\pm 1 \text{ V}$:



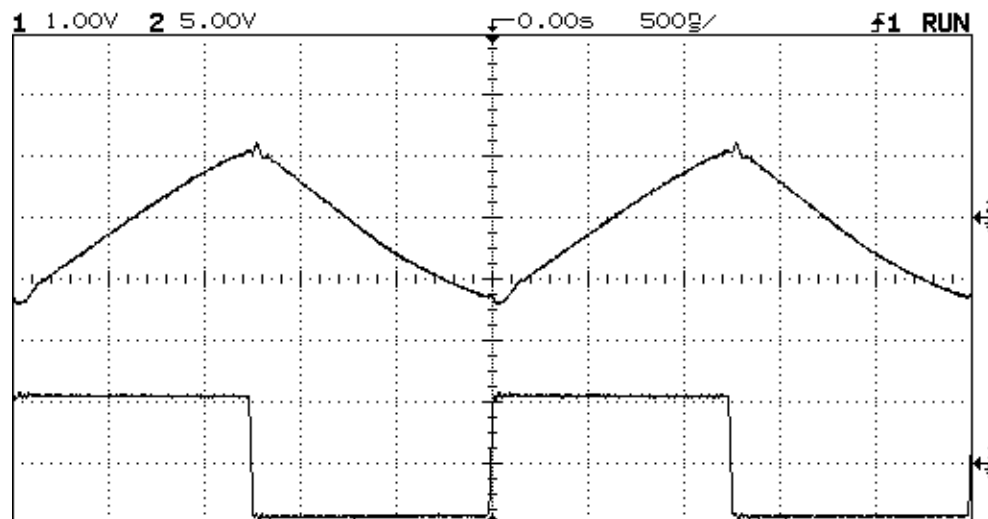
En entrée, signal de 100 kHz et d'amplitude ± 1 V :



Dans les deux cas, on observe une légère influence du slew rate, car l'amplitude de l'entrée dépasse légèrement ± 700 mV :



En entrée, signal de 400 kHz et d'amplitude ± 1 V :



Le slew rate déforme complètement le signal de sortie :
il devient triangulaire et son amplitude s'écroule.

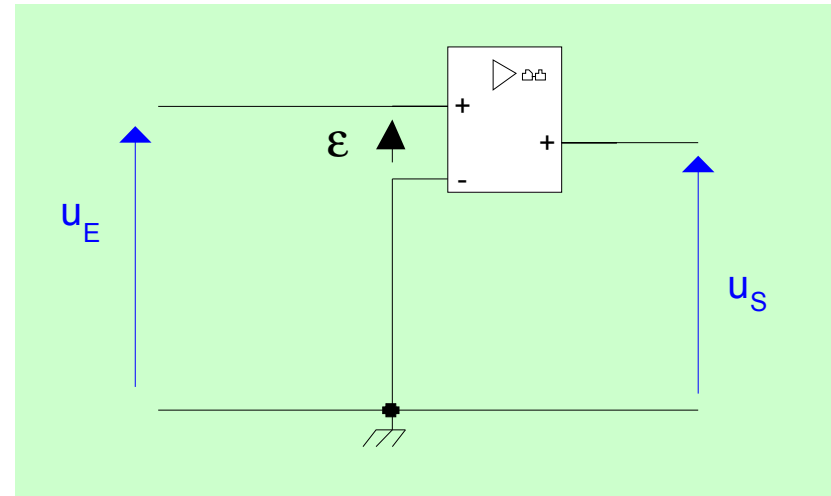
4- L'A.O. en commutation

Jusqu'à présent, nous avons étudié l'A.O. dans des montages où il fonctionne en régime linéaire.

Qu'en est-il en régime de saturation ?

4-1- Montage comparateur non inverseur à un seuil

$\mu A741$ $V_{cc\pm} = \pm 15 \text{ V}$
tension de seuil : 0 V



En entrée triangle d'amplitude crête à crête 20 V

Pente du signal d'entrée (en valeur absolue) : **a**

Le slew rate intervient si la pente du signal d'entrée, au moment du basculement de la sortie, est supérieure à :

$$\frac{SR^2}{4\pi B_1 \Delta V_{sat}}$$

$$\text{A.N. } \mu\text{A741} \quad \frac{(0,85 \cdot 10^6)^2}{4\pi \cdot 10^6 \cdot 27} = 2100 \text{ V/s}$$

Dans ce cas, la durée de commutation est :

$$t_c = \frac{SR}{4\pi a B_1} + \frac{\Delta V_{sat}}{SR}$$

Autrement (pas de slew rate) :

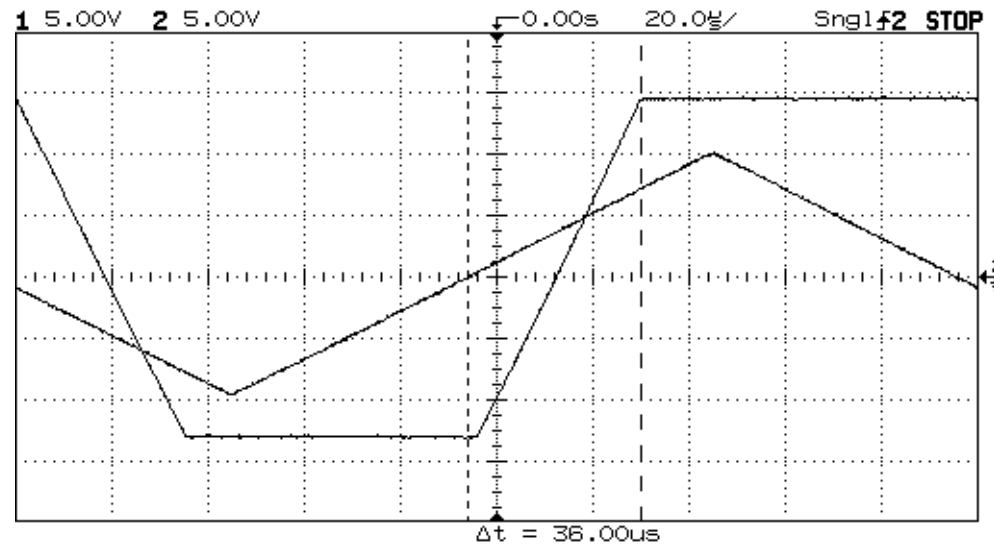
$$t_c = \sqrt{\frac{\Delta V_{sat}}{\pi a B_1}}$$

Cf. Annexe A pour la justification théorique.

- $f = 5 \text{ kHz}$ pente $200\,000 \text{ V/s}$

Voie 1 : u_E

Voie 2 : u_S



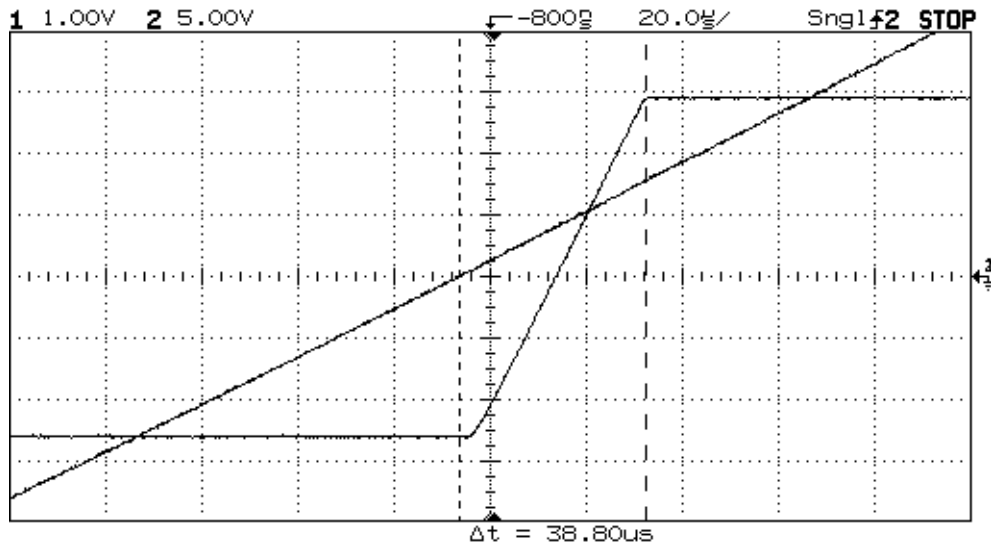
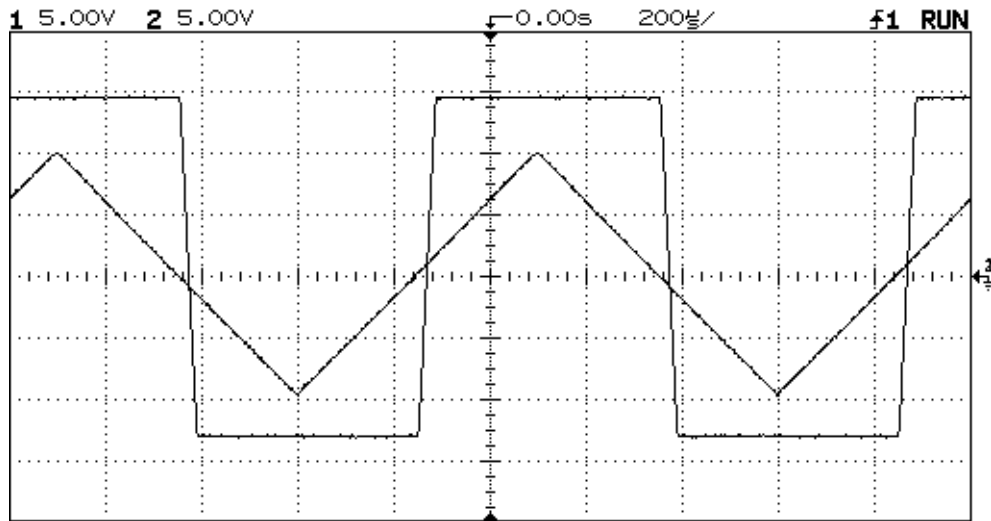
Présence de slew rate

Durée de commutation mesurée : $36 \mu s$

Par le calcul :

$$t_c = \frac{0,85 \cdot 10^6}{4\pi \cdot 200000 \cdot 10^6} + \frac{27}{0,85 \cdot 10^6} \approx \frac{27}{0,85 \cdot 10^6} = 32 \mu s$$

- $f = 1 \text{ kHz}$ pente $40\,000 \text{ V/s}$



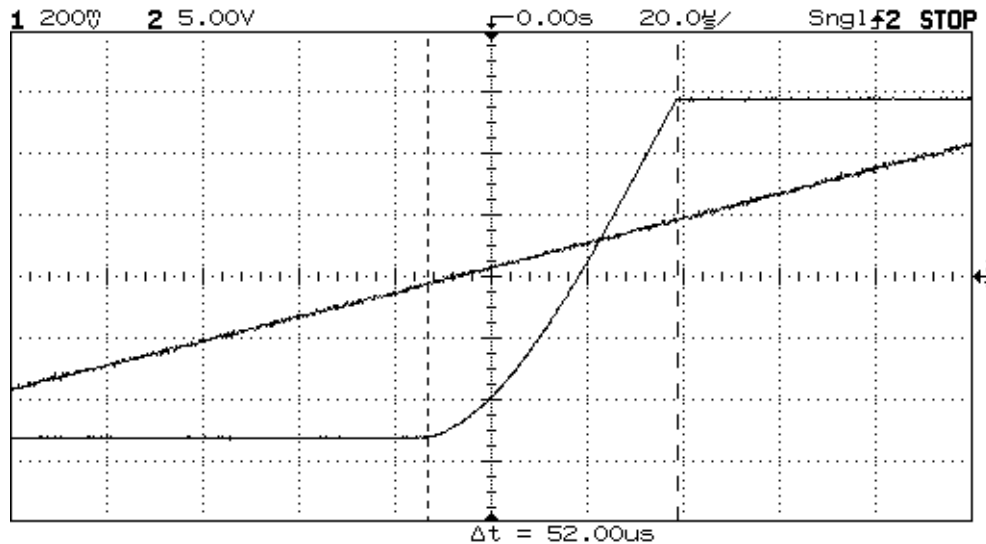
Présence de slew rate

Durée de commutation mesurée : 38,8 μs

Par le calcul :

$$t_c = \frac{0,85 \cdot 10^6}{4\pi \cdot 40000 \cdot 10^6} + \frac{27}{0,85 \cdot 10^6} = 33 \mu\text{s}$$

- $f = 100 \text{ Hz}$ pente $4\,000 \text{ V/s}$



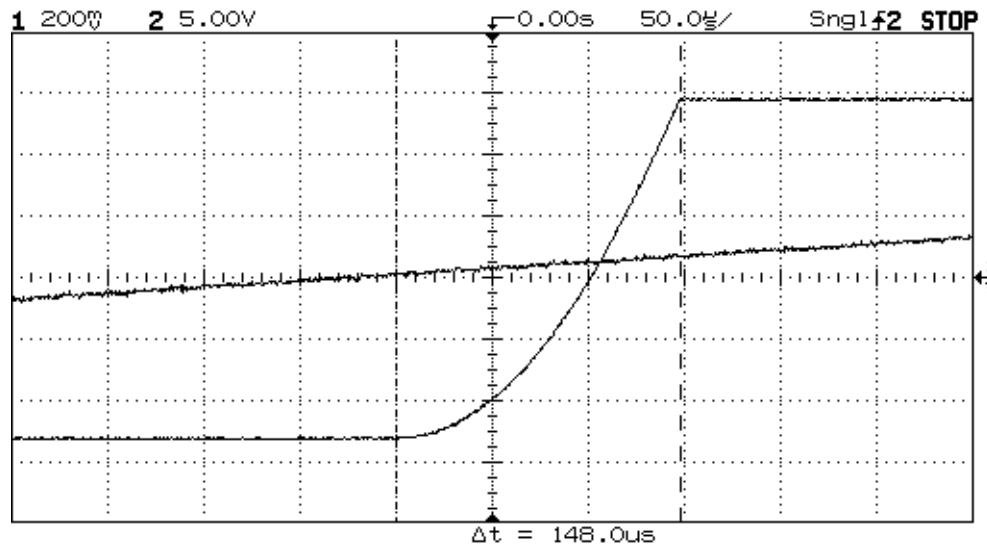
Présence de slew rate

Durée de commutation mesurée : $52 \mu\text{s}$

Par le calcul :

$$t_c = \frac{0,85 \cdot 10^6}{4\pi \cdot 4000 \cdot 10^6} + \frac{27}{0,85 \cdot 10^6} = 17 \mu\text{s} + 32 \mu\text{s} = 49 \mu\text{s}$$

- $f = 10 \text{ Hz}$ pente 400 V/s



Pas de slew rate

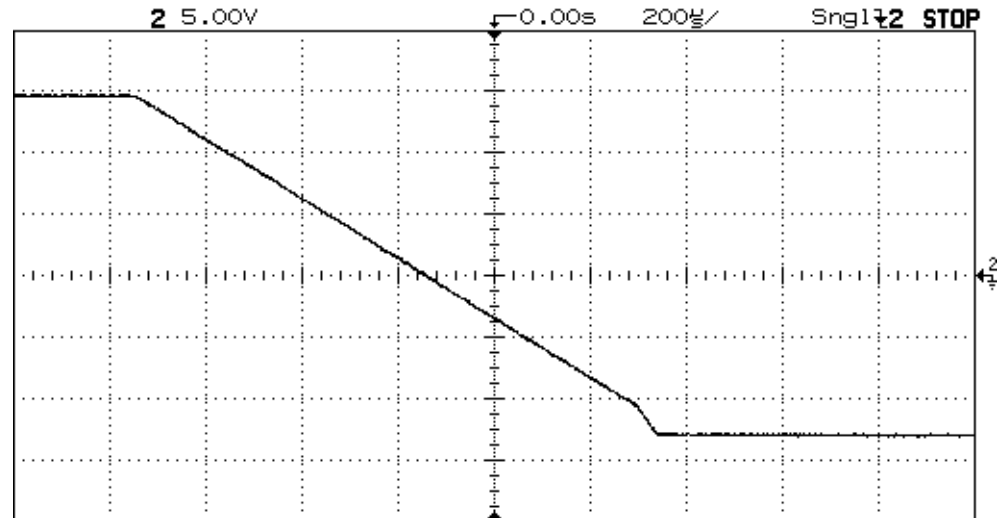
Durée de commutation mesurée : $148 \mu\text{s}$

Par le calcul :

$$t_c = \sqrt{\frac{27}{\pi \cdot 400 \cdot 10^6}} = 147 \mu\text{s}$$

Remarque : la tension de sortie est parabolique.

- $f = 0,1 \text{ Hz}$ pente 4 V/s



Pas de slew rate

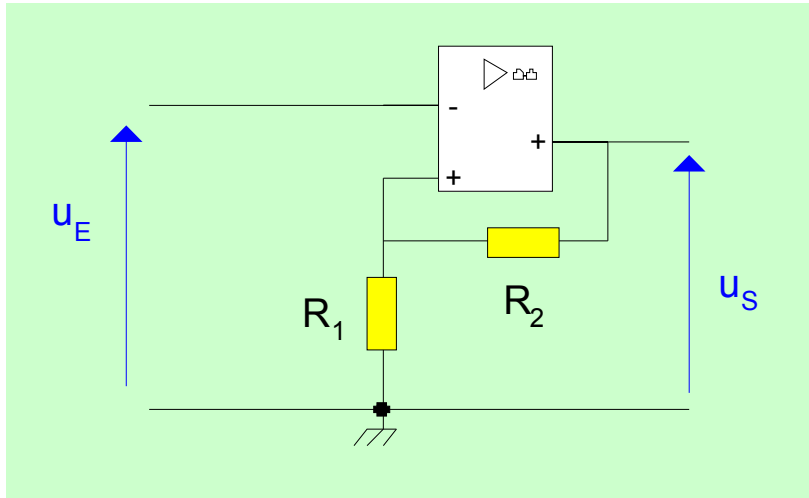
Durée de commutation mesurée : $1100 \mu\text{s}$

Par le calcul :

$$t_c = \sqrt{\frac{27}{\pi \cdot 4 \cdot 10^6}} = 1470 \mu\text{s}$$

Remarque : la théorie indique (Cf. Annexe A) que l'allure de la sortie devrait être parabolique ... on touche aux limites de la modélisation.

4-2- Montage trigger inverseur



Deux tensions de seuil :

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{\text{sat}\pm}$$

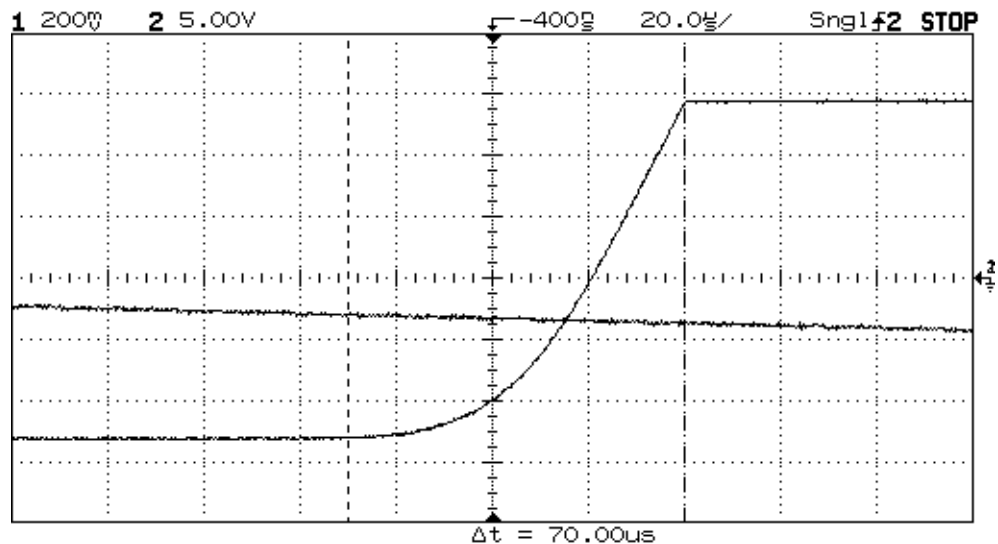
$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 100 \text{ k}\Omega$$

$$\mu\text{A741 } V_{CC\pm} = \pm 15 \text{ V}$$

tensions de seuil : $\pm 130 \text{ mV}$

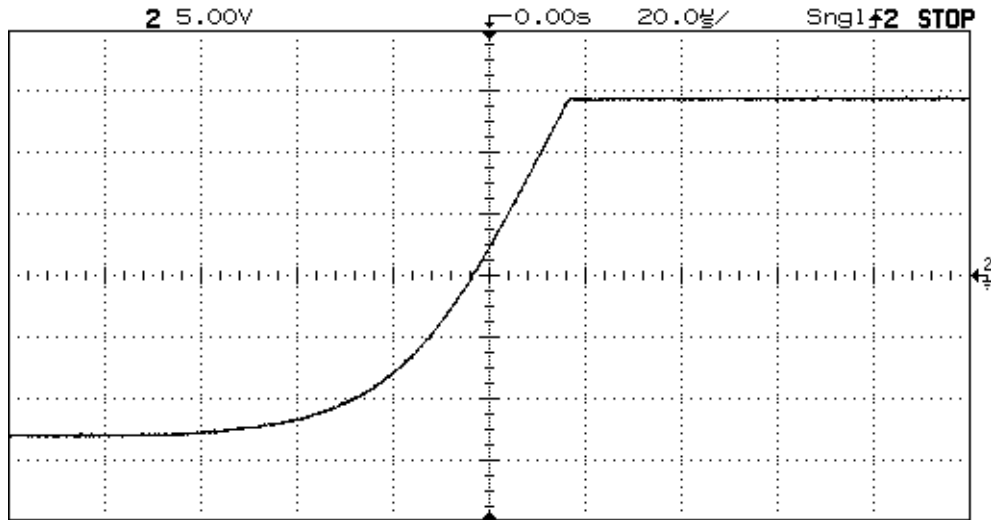
- $f = 10 \text{ Hz}$ pente 400 V/s



Présence de slew rate

Durée de commutation mesurée : $70 \mu\text{s}$

- $f = 0,1 \text{ Hz}$ pente 4 V/s



Présence de slew rate

Durée de commutation mesurée : $110 \mu\text{s}$

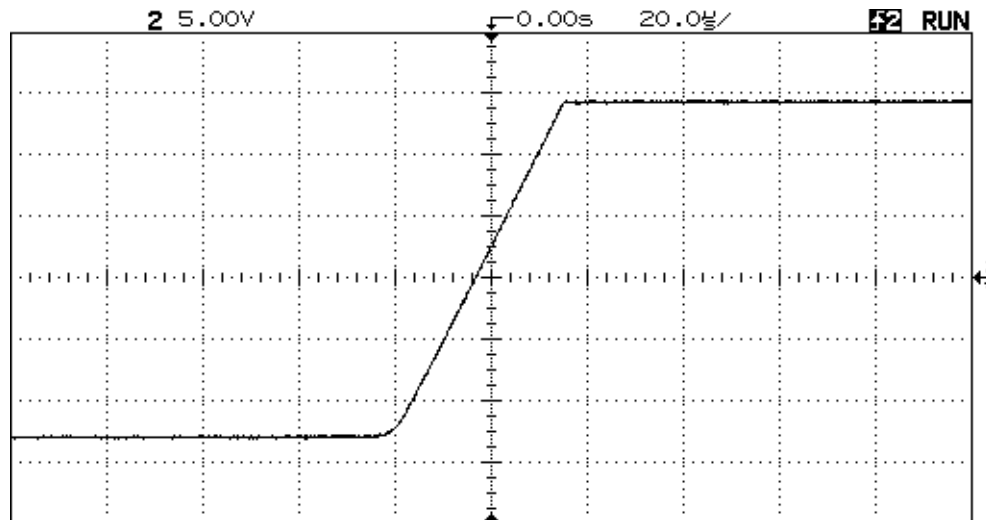
$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$\mu\text{A741} \quad V_{CC\pm} = \pm 15 \text{ V}$$

Tensions de seuil : $\pm 1,3 \text{ V}$

- $f = 0,1 \text{ Hz}$ pente 4 V/s



Présence de slew rate

Durée de commutation mesurée : $40 \mu\text{s}$

Résumé

La durée de commutation augmente quand la pente du signal d'entrée diminue.

En sortie, initialement la pente est nulle avec une allure parabolique, puis pour des signaux d'entrée de pente suffisante, l'allure devient linéaire (à cause du slew rate).

La durée de commutation du trigger est plus faible que celle du comparateur à un seuil.

La durée de commutation du trigger diminue quand l'amplification en boucle fermée diminue ($A = 1 + R_2/R_1$ dans notre exemple).

5- Simulation avec Matlab/Simulink (avec versions 4.2 & 6.5)

La référence en matière de simulation des circuits électroniques est PSPICE.

Mais pour mettre en avant l'aspect système en boucle fermée de beaucoup de montage à A.O., nous allons utiliser Matlab/Simulink.

L'outil Simulink de Matlab permet de simuler les systèmes de régulation et les asservissements (domaine de l'automatique).

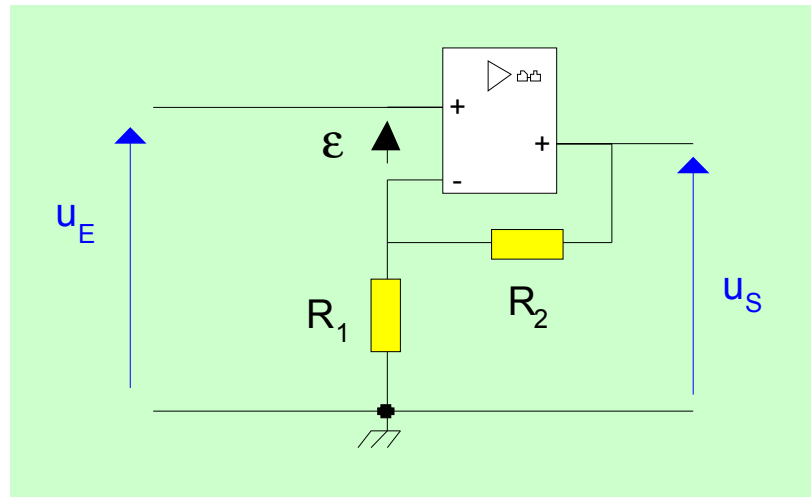
5-1- Simulation de l'amplificateur non inverseur

TL071 $V_{cc\pm} = \pm 15 \text{ V}$

$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$

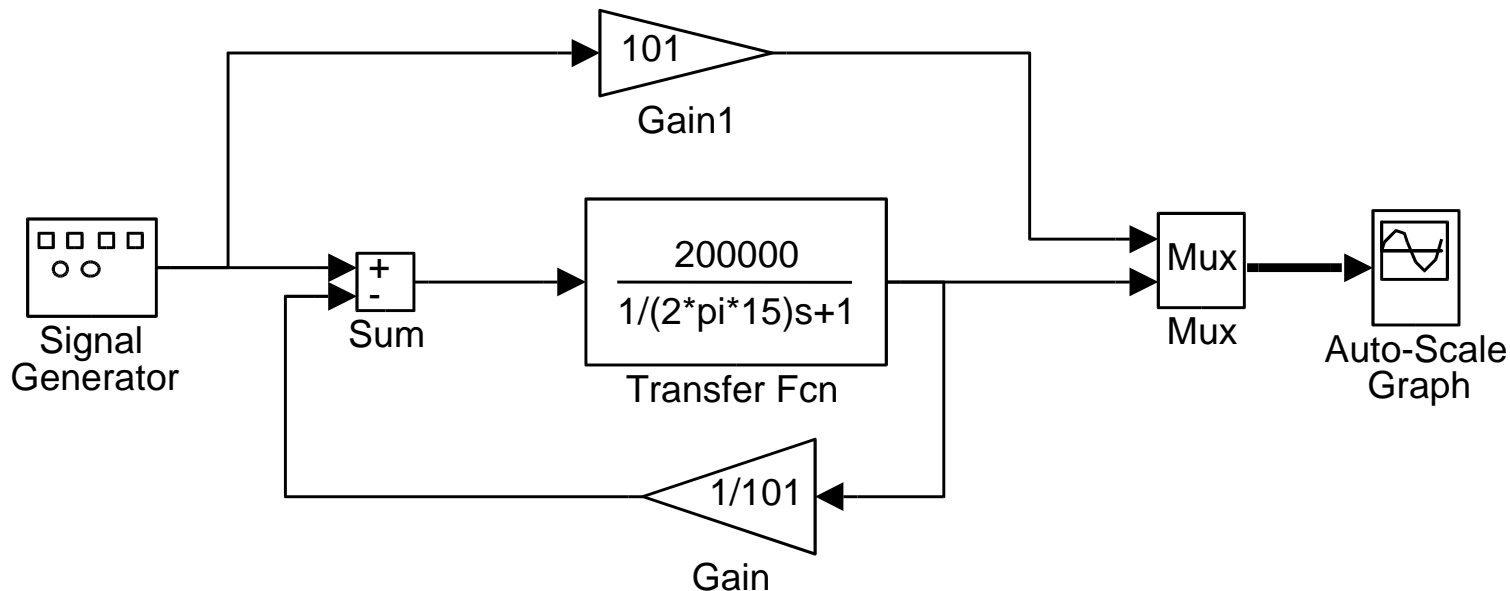
$R_2 = 100 \text{ k}\Omega$

$A = 101$



- Fichier : sim001_1.m

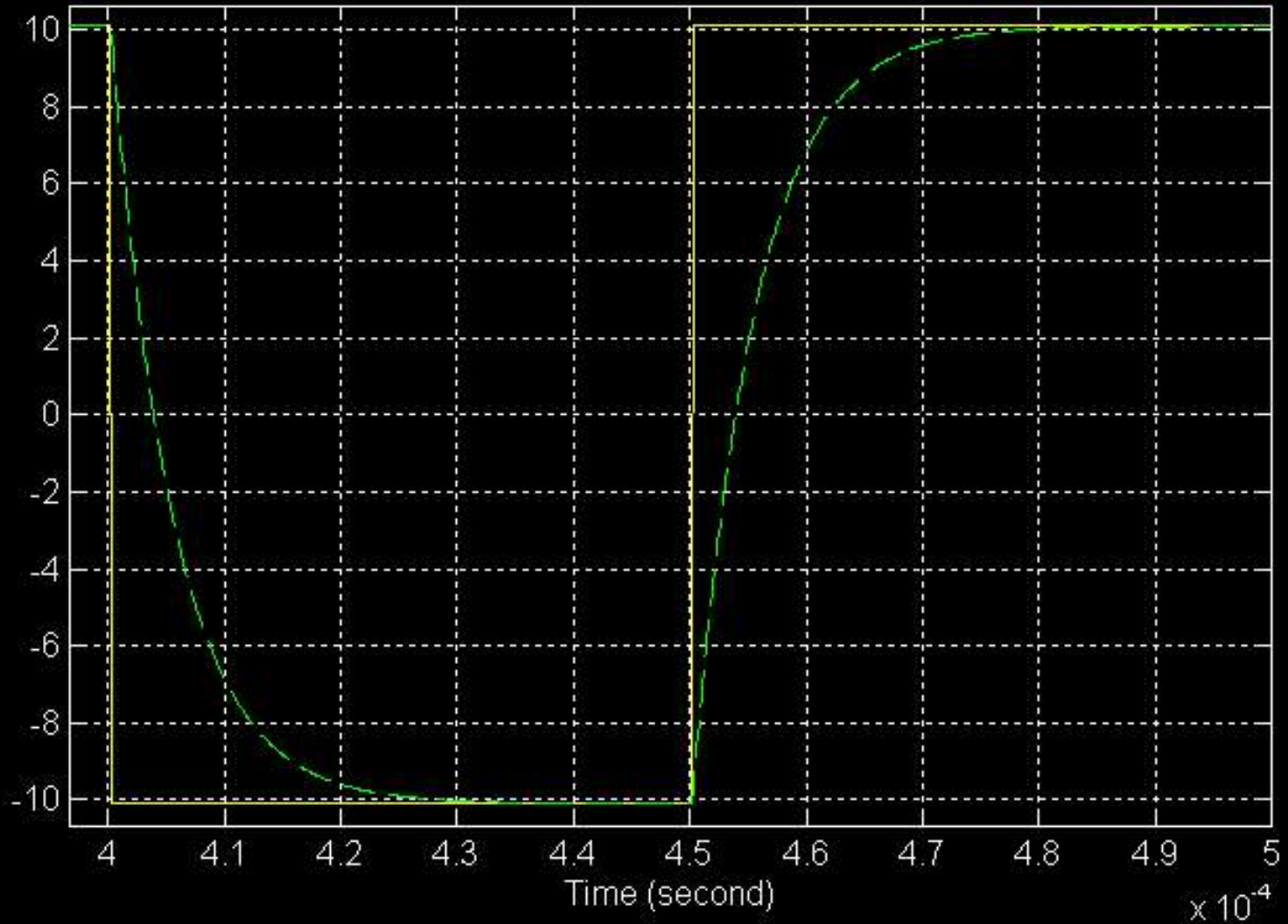
simulation d'un amplificateur non inverseur (TL071)



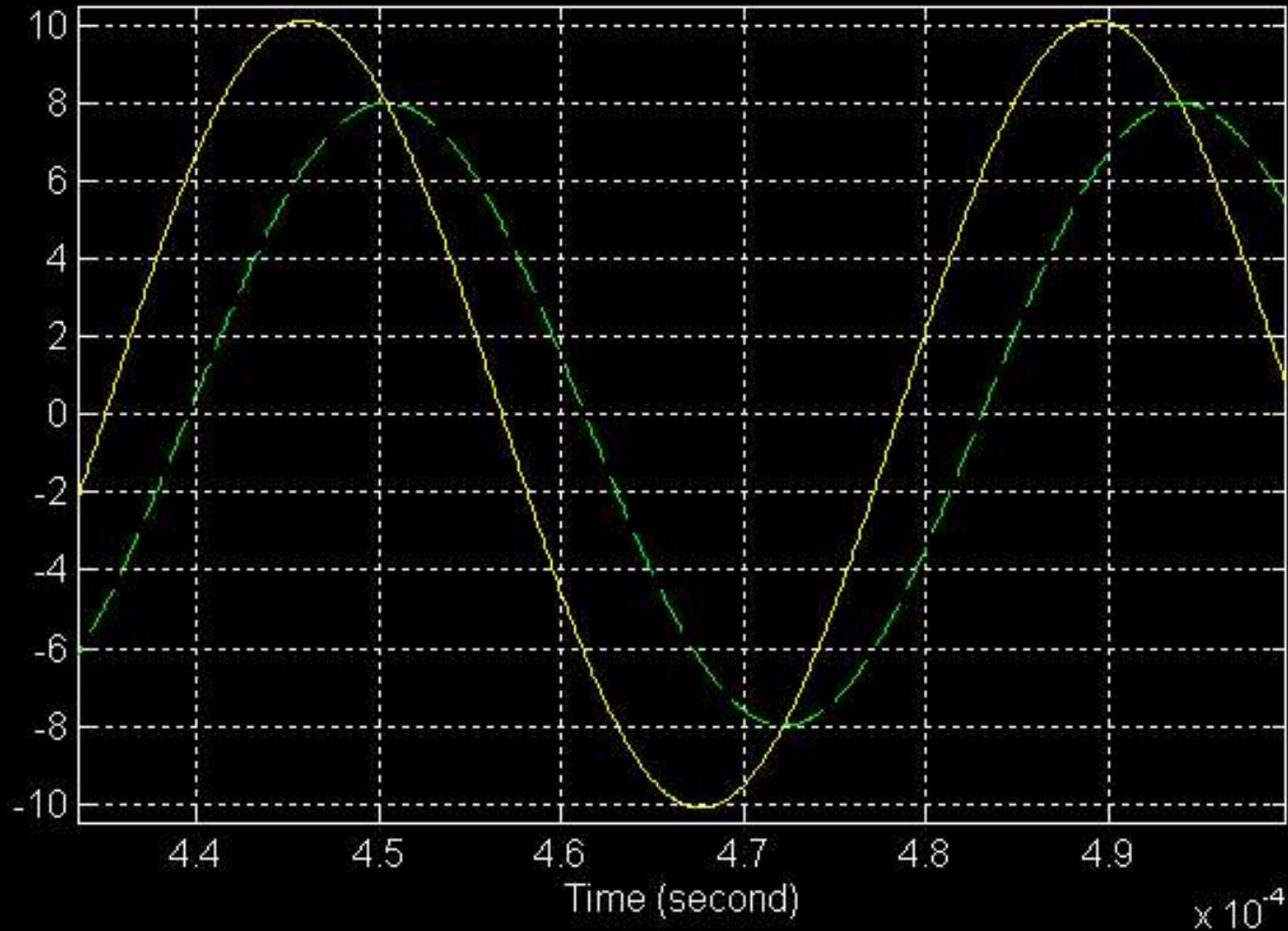
Le TL071 est modélisé par une fonction de transfert du 1er ordre ($A_o = 200\ 000$ et $f_o = 15$ Hz).

notation : $s = j\omega$

- Simulation avec en entrée un créneau ± 100 mV de 10 kHz :



- Fichier `sim002_1.m`
- Simulation avec en entrée, un sinus ± 100 mV de 23 kHz :

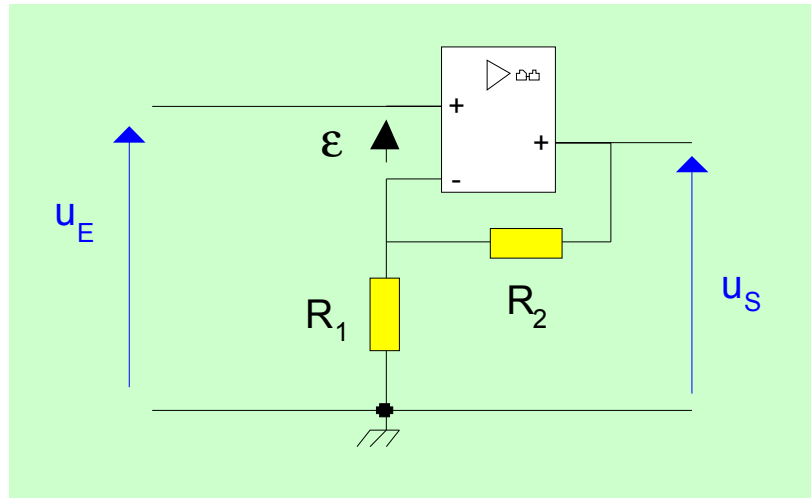


TL071 $V_{CC\pm} = \pm 15 \text{ V}$

$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$

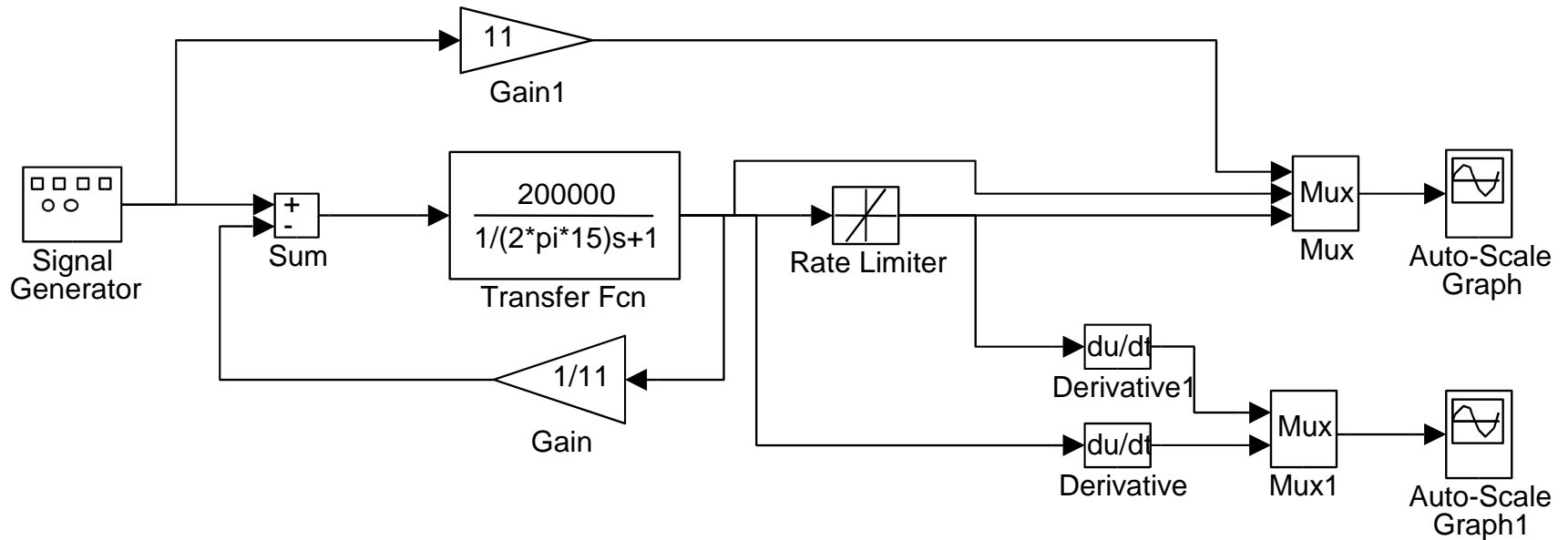
$R_2 = 10 \text{ k}\Omega$

$A = 11$

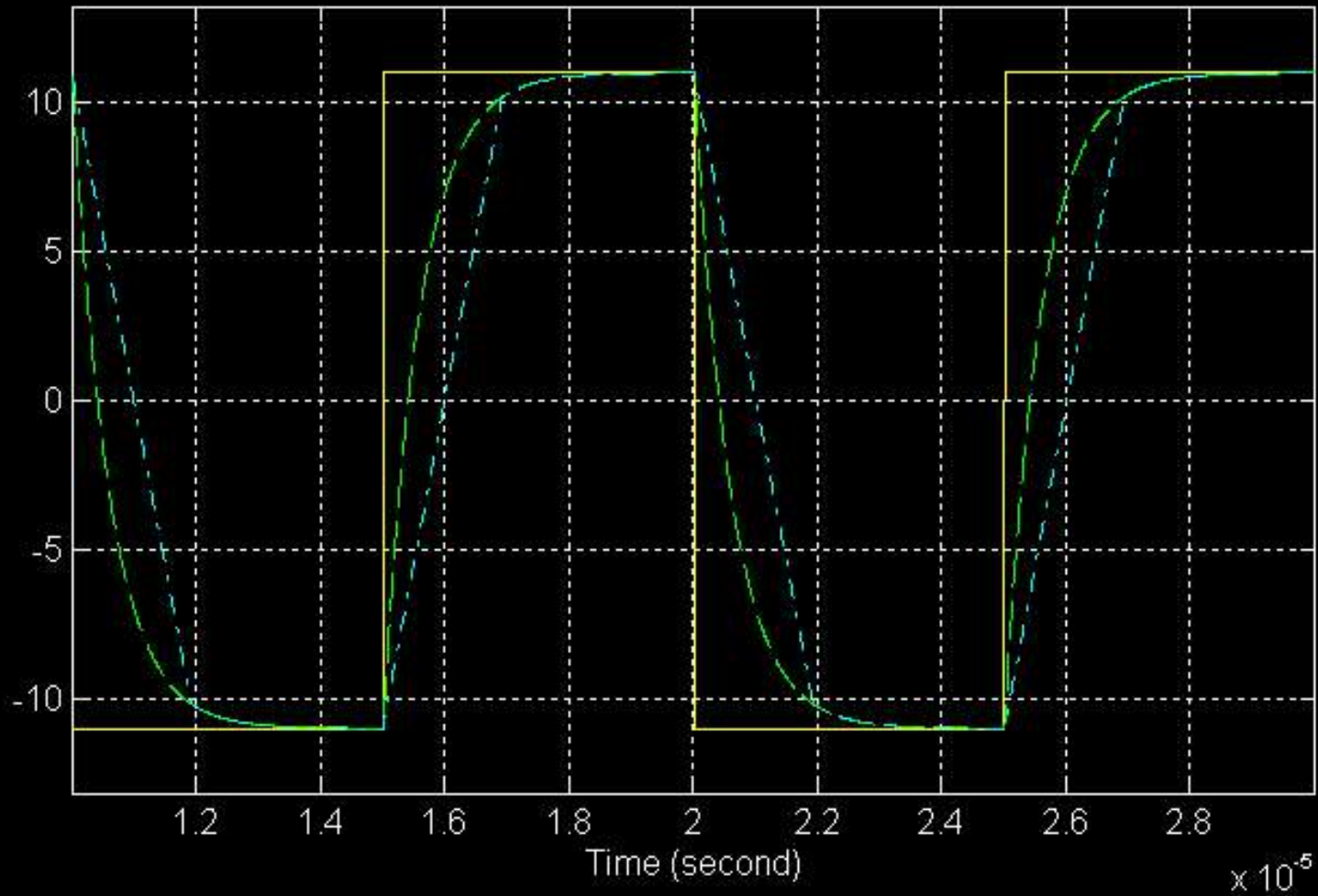


- Fichier sim003_1.m

simulation d'un amplificateur non inverseur (TL071)

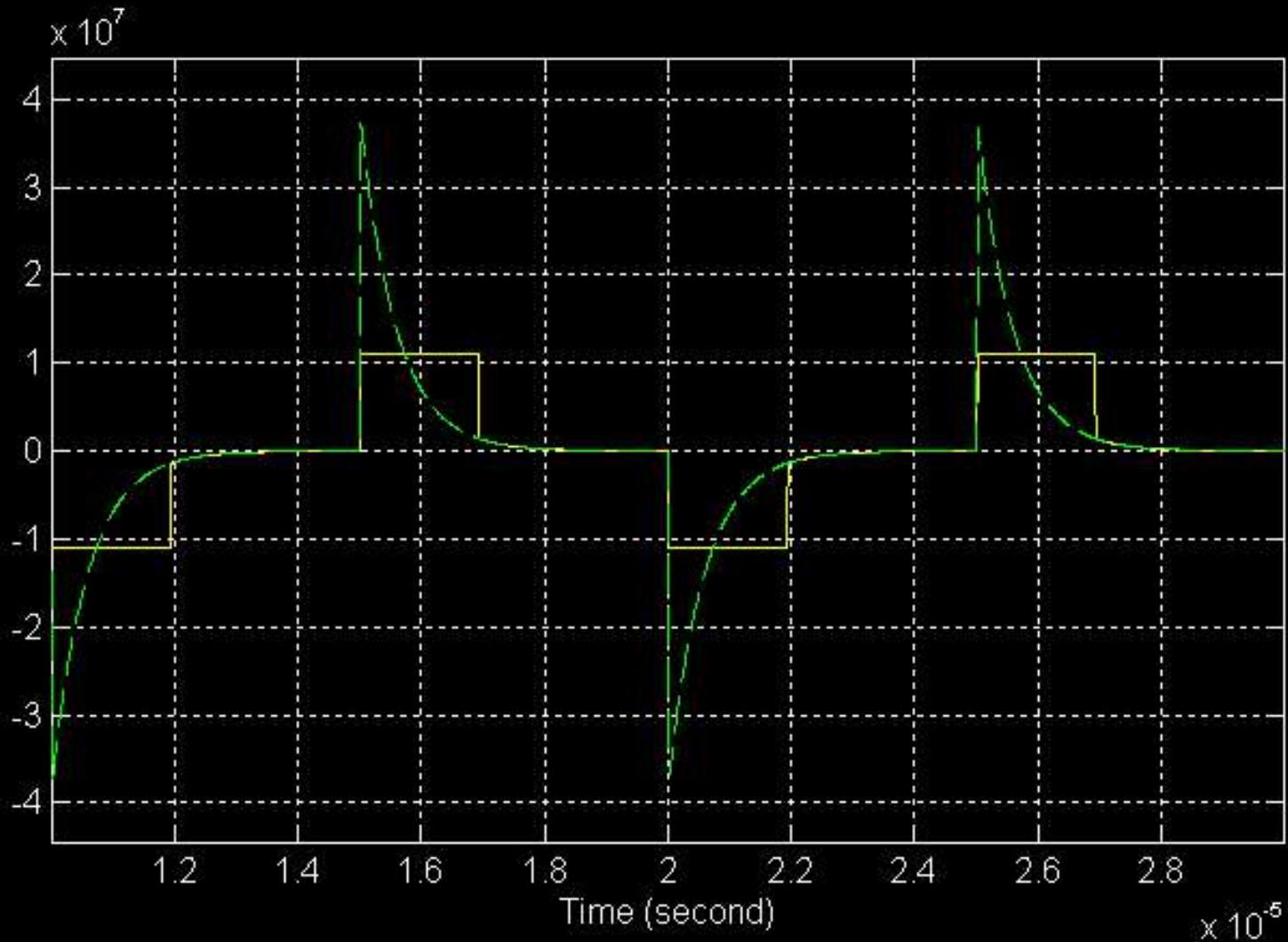


- Simulation avec en entrée un créneau ± 1 V de 100 kHz :



En bleu : tension de sortie (en V)

En vert : tension de sortie sans prise en compte du slew rate

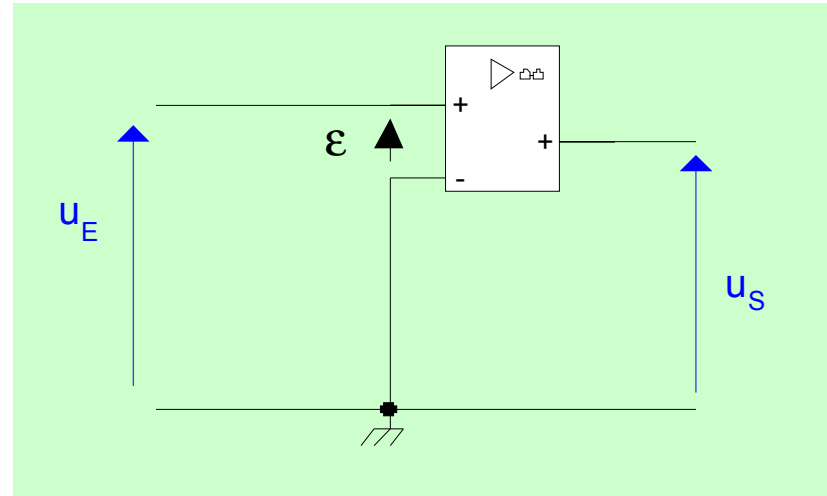


En jaune : pente de la tension de sortie (en V/s)

En vert : sans prise en compte du slew rate ($11 \text{ V}/\mu\text{s}$)

5-2- Simulation du comparateur à un seuil

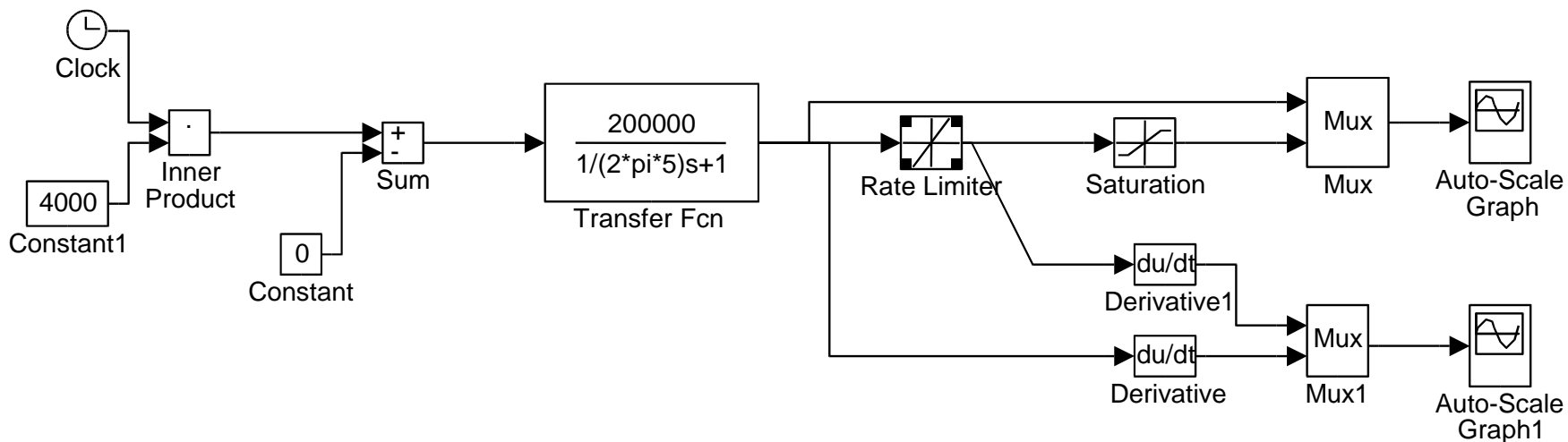
$\mu A741$ $V_{cc\pm} = \pm 15$ V
tension de seuil : 0 V



Le $\mu A741$ est modélisé par une fonction de transfert du 1er ordre ($A_o = 200\ 000$ et $f_o = 5$ Hz).

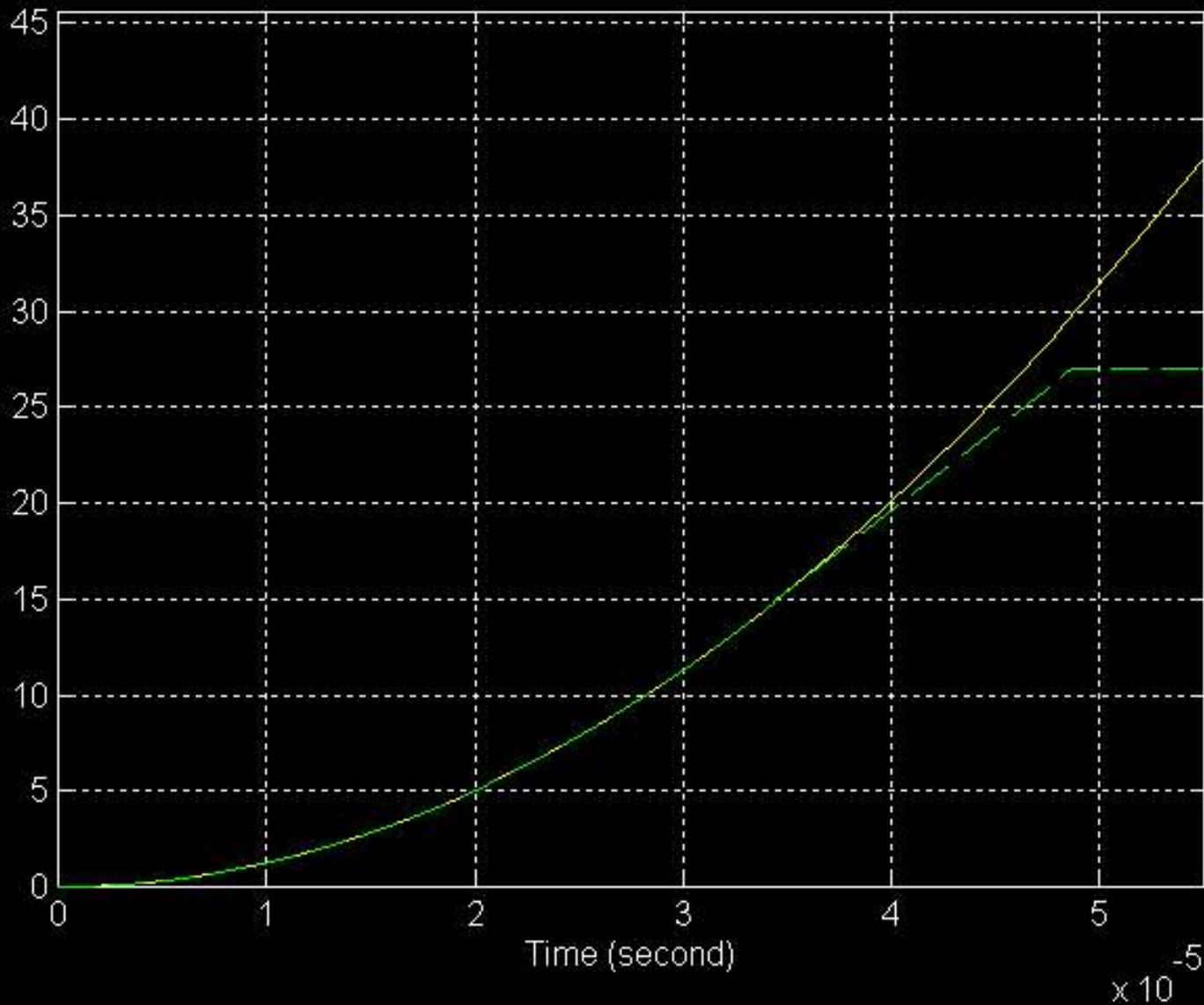
- Fichier sim004_2.m

simulation d'un comparateur simple (741)

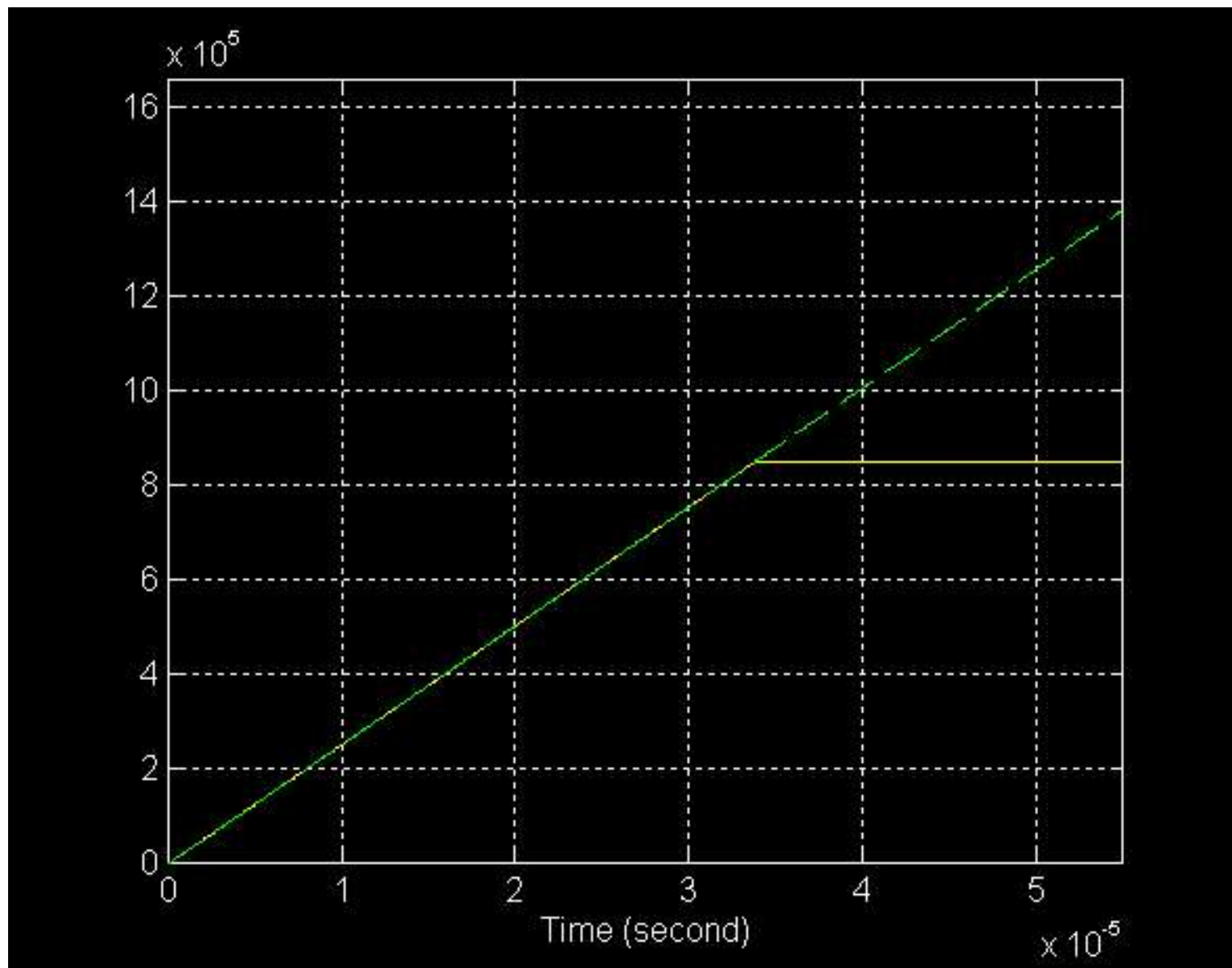


Pente du signal d'entrée 4000 V/s

Il faut translater vers le bas la tension de sortie de 13,5 V :



En jaune : tension de sortie (en V) sans prise en compte du slew rate et de la saturation ($\pm 13,5$ V)



En vert : pente de la tension de sortie (en V/s) sans prise en compte du slew rate ($0,85 \text{ V}/\mu\text{s}$)

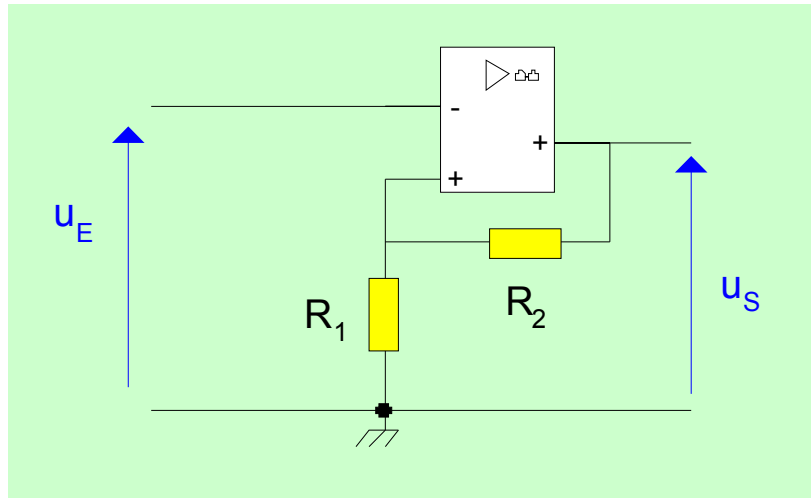
La simulation donne une durée de commutation de 48,7 μs .

On notera que le slew rate apparaît après 33 μs .

Pour d'autres valeurs de la pente, on obtient :

4 V/s	1,48 ms
40 V/s	465 μs
400 V/s	147 μs
4 000 V/s	48,7 μs
40 000 V/s	33,5 μs
200 000 V/s	32,1 μs

5-3- Simulation du trigger inverseur



$\mu A741 \quad V_{CC\pm} = \pm 15 \text{ V}$

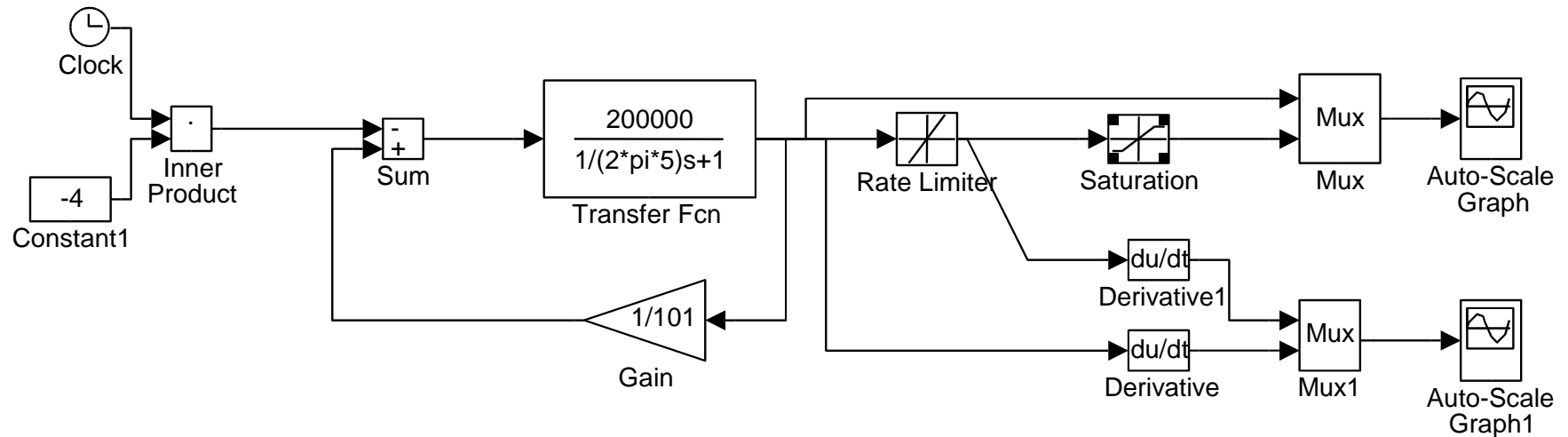
$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$

$R_2 = 100 \text{ k}\Omega$

$A = 101$

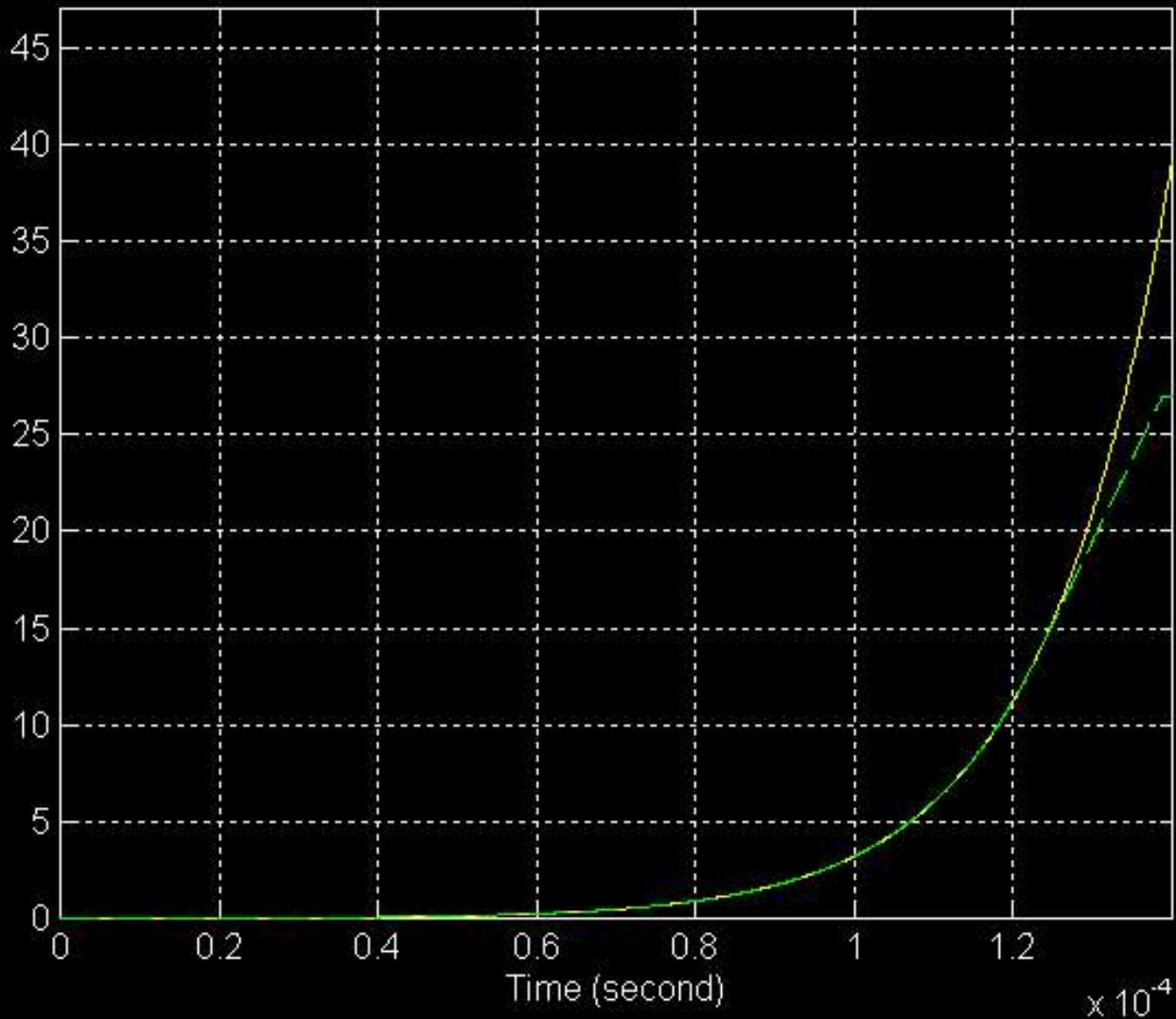
- Fichier sim005_1.m

simulation d'un trigger (741)

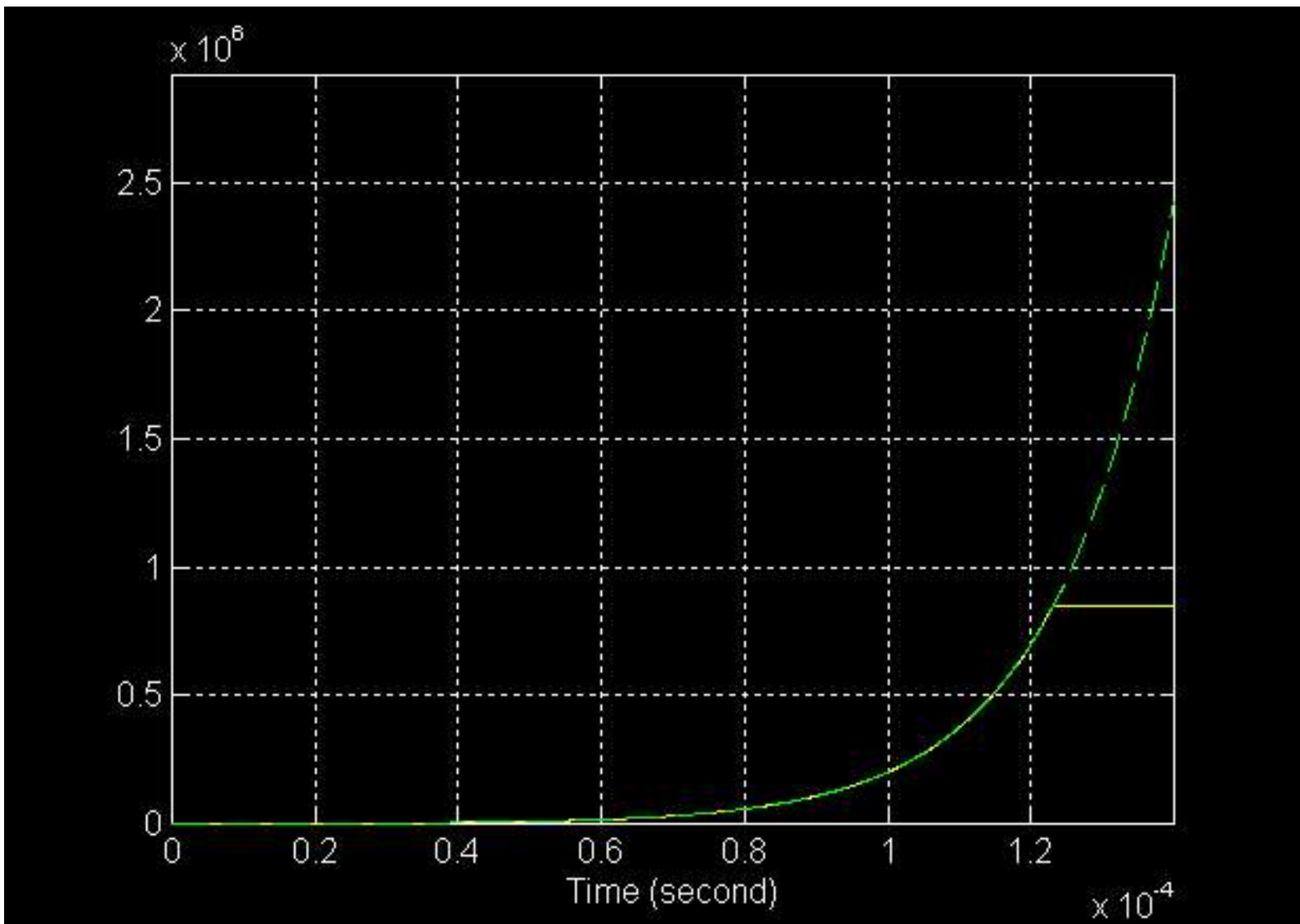


Pente du signal d'entrée 4 V/s

Il faut traduire la tension de sortie de 13,5 V vers le bas :



En jaune : tension de sortie (en V)
sans prise en compte du slew rate et de la saturation



En vert : pente de la tension de sortie (en V/s) sans prise en compte du slew rate

La simulation donne une durée de commutation de 139 μs .

Pour d'autres valeurs de la pente, on obtient :

4 V/s	139 μs
40 V/s	102 μs
400 V/s	67,8 μs
4 000 V/s	42,6 μs
40 000 V/s	33,4 μs
200 000 V/s	32,1 μs

- Fichier sim006_1.m

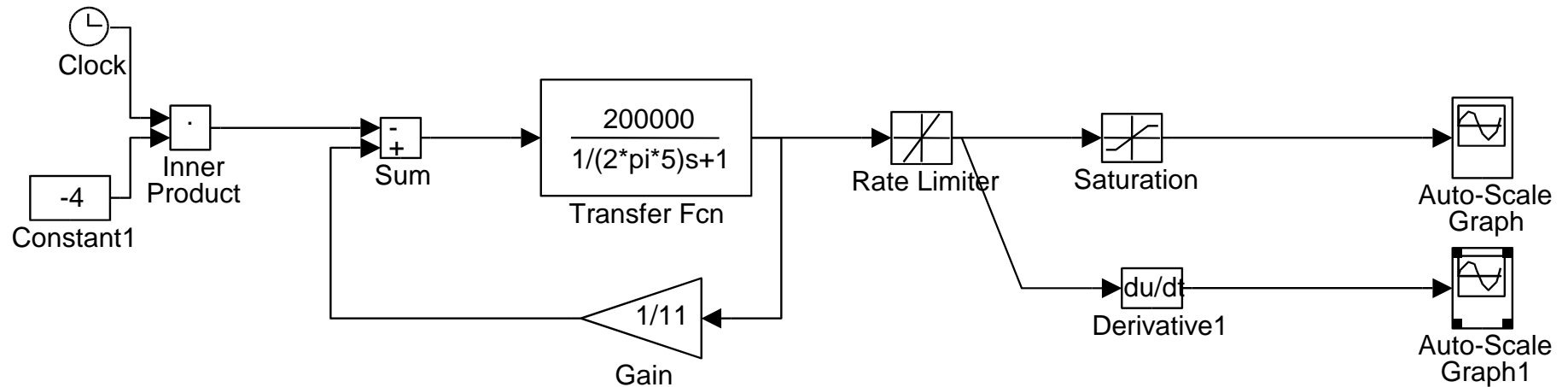
$\mu A071 \quad V_{cc\pm} = \pm 15 \text{ V}$

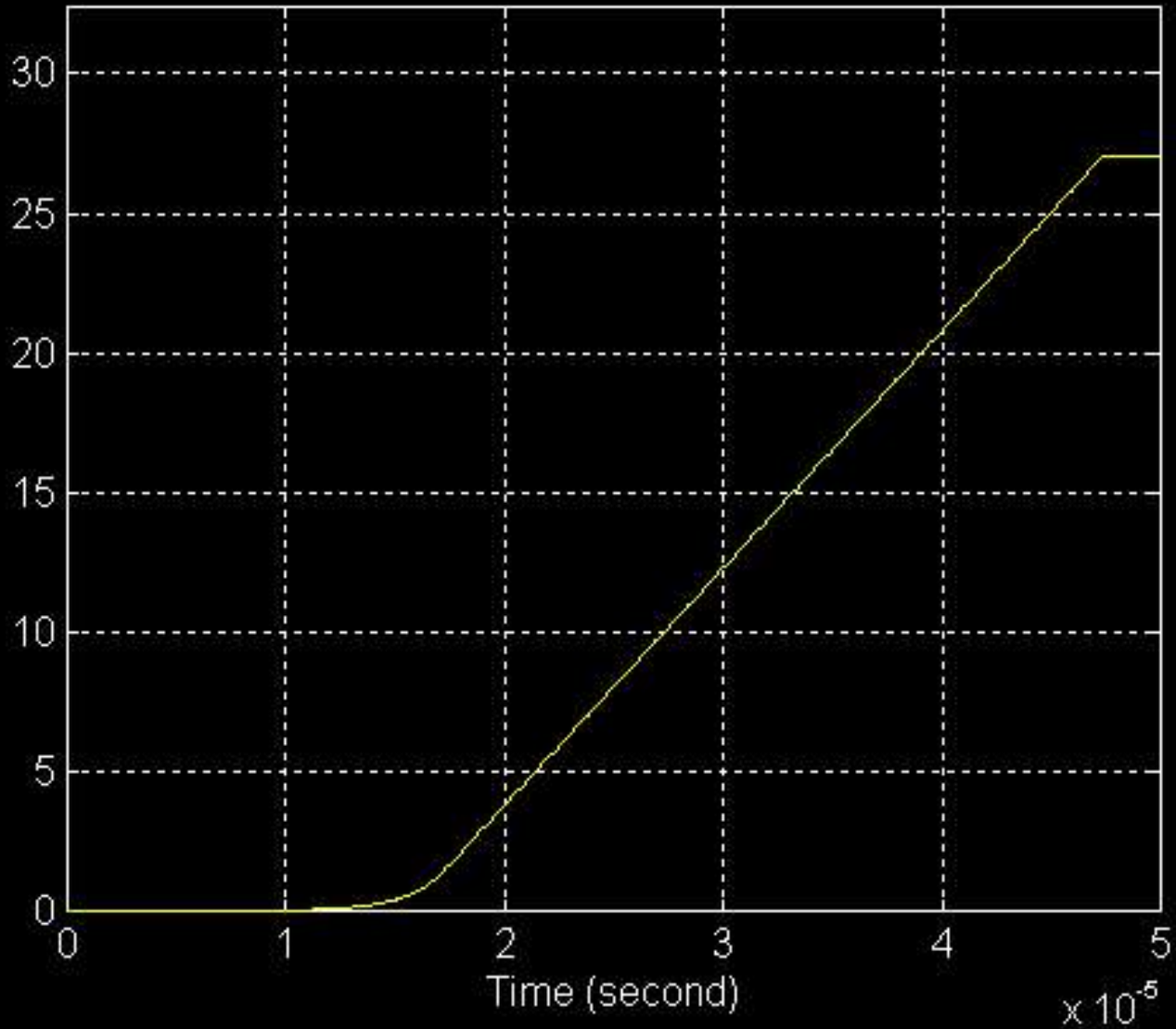
$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$

$R_2 = 10 \text{ k}\Omega$

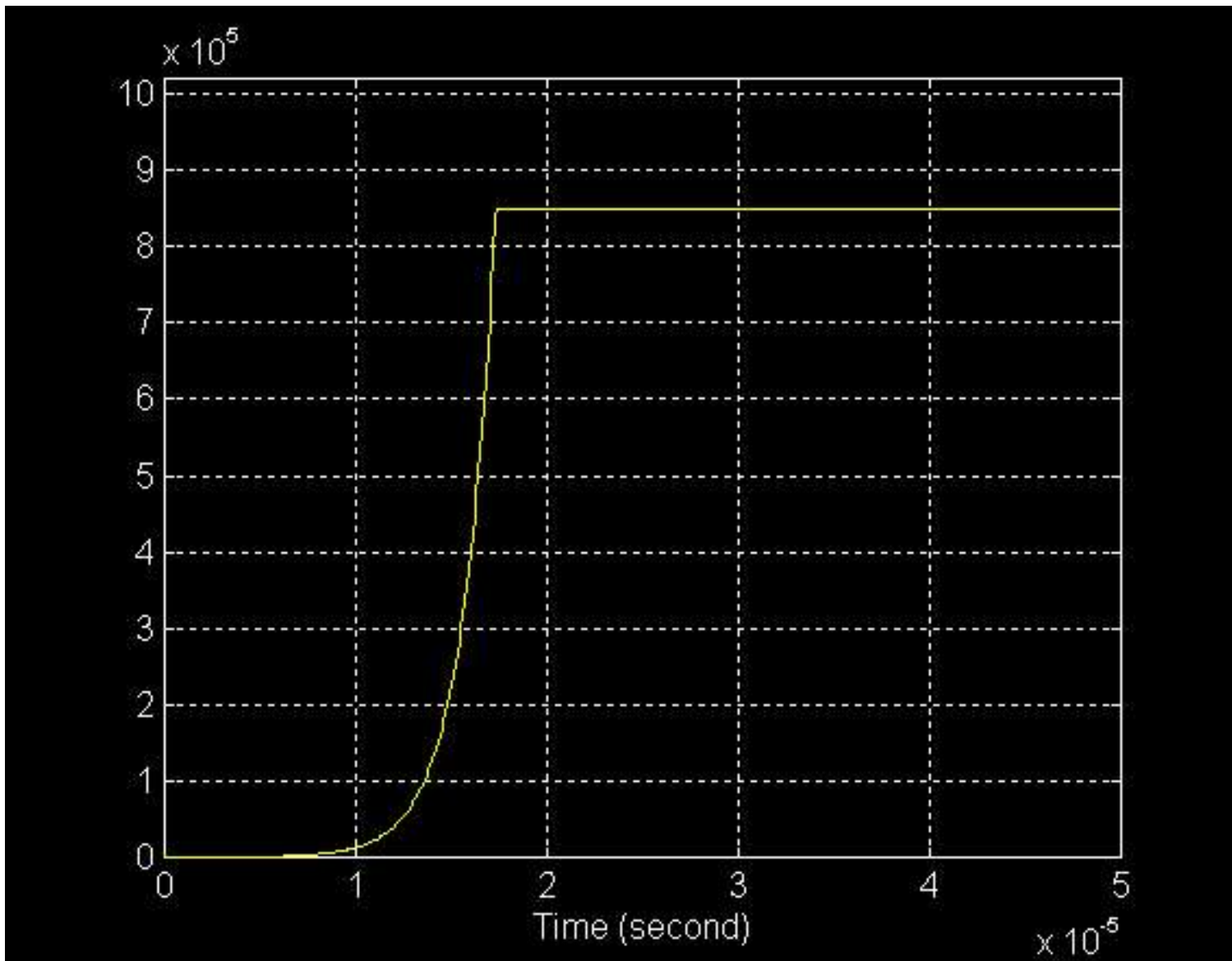
$A = 11$

simulation d'un trigger (741)





Tension de sortie (en V)



Pente de la tension de sortie (en V/s)

La simulation donne une durée de commutation de 47,3 μs .

Pour d'autres valeurs de la pente, on obtient :

4 V/s	47,3 μs
40 V/s	43,3 μs
400 V/s	39,3 μs
4 000 V/s	35,6 μs
40 000 V/s	32,9 μs
200 000 V/s	32,1 μs

- Tableau comparatif des durées de commutation :

pente	Comparateur à un seuil	Trigger (A=101)	Trigger (A=11)
4 V/s	1,48 ms	139 μ s	47,3 μ s
40 V/s	465 μ s	102 μ s	43,3 μ s
400 V/s	147 μ s	67,8 μ s	39,3 μ s
4 000 V/s	48,7 μ s	42,6 μ s	35,6 μ s
40 000 V/s	33,5 μ s	33,4 μ s	32,9 μ s
200 000 V/s	32,1 μ s	32,1 μ s	32,1 μ s

Les résultats de la simulation sont conformes aux résultats expérimentaux.

Conclusion

On retiendra que l'A.O. possède une bande passante qui diminue quand le gain en boucle fermée augmente.

Il y a donc un compromis à faire.

- **A.O. en régime linéaire (amplification, filtrage ...)**

Les A.O. d'usage courant comme le $\mu A741$ permettent de traiter des signaux jusqu'à quelques dizaines de **kHz**.

Au delà, il faut utiliser des circuits intégrés spécialisés :

- amplificateur "high-speed" (bande passante B_1 de quelques dizaines de MHz)
- amplificateur "vidéo" (bande passante B_1 de quelques centaines de MHz)

- **AO en commutation (comparateur, trigger ...)**

On peut très bien utiliser des A.O. d'usage courant pour réaliser la fonction comparaison.

Mais il est préférable de prendre des A.O. spécialement prévus à cet effet (LM 311, LM319 ...).

Bibliographie

- Op Amps For Everyone, Chapter 11, by Bruce Carter, Ron Mancini—Editor in Chief.

Copyright © 2000, Texas Instruments Incorporated

- www.ti.com (site officiel de Texas Instruments)
- www.mathworks.com (site officiel de Matlab/Simulink)

Exercices

- **Exercice 1** : du TL071 et du $\mu\text{A}741$ qui est le plus rapide ?

Réponse :

Il faut comparer la bande passante ainsi que le slew rate.

TL071 : $B_1 = 3 \text{ MHz}$

$$\text{SR} = 13 \text{ V}/\mu\text{s}$$

$\mu\text{A}741$: $B_1 = 1 \text{ MHz}$

$$\text{SR} = 0,5 \text{ V}/\mu\text{s}$$

C'est donc le TL071 le plus rapide.

• Exercice 2

a) On désire amplifier de 50 dB un signal audio.

Quelle doit être la fréquence de coupure minimale de l'amplificateur ?

b) Est-ce possible de réaliser l'amplification avec un $\mu A741$ ($B_1=1$ MHz) ?

c) Et avec un amplificateur à deux étages ($2 \times \mu A741$) ?

Réponse

a) La fréquence maximale d'un signal audio est 20 kHz.
La fréquence de coupure doit donc être d'au moins 20 kHz.

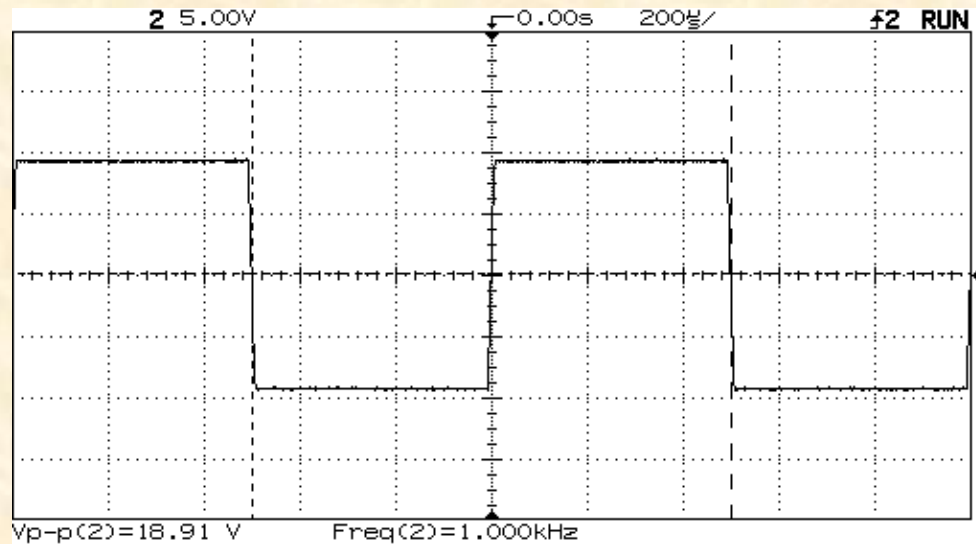
b) Utilisons par exemple le montage amplificateur non inverseur.
Un gain de 50 dB correspond à une amplification de 316.
Fréquence de coupure : $1 \text{ MHz} / 316 = 3 \text{ kHz}$ ce qui est insuffisant.

c)
1er étage : gain de 25 dB (amplification 17,8)
2ème étage : gain de 25 dB
Au total : $25 + 25 = 50$ dB ($17,8 \times 17,8 = 316$)

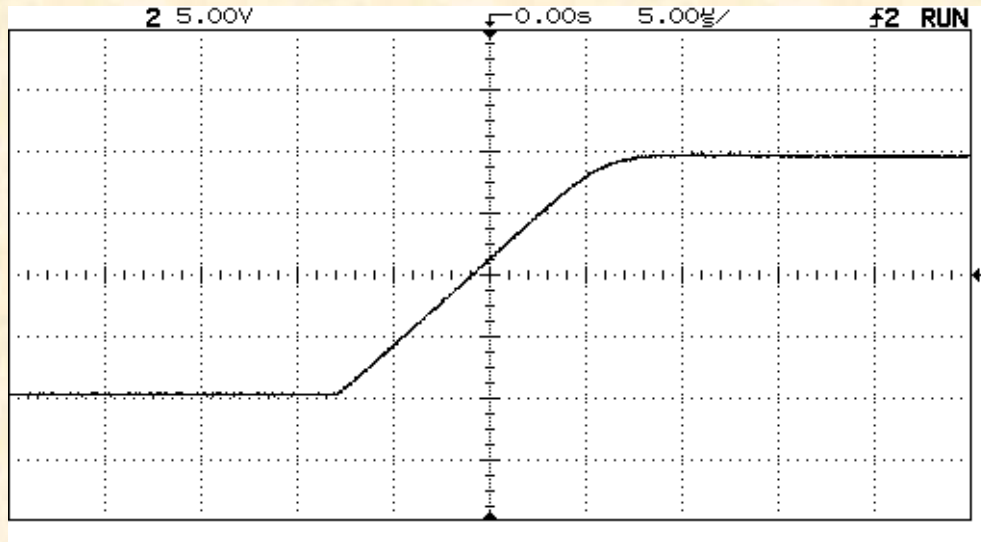
Chaque étage a une fréquence de coupure à -3 dB de
 $1 \text{ MHz} / 17,8 = 56 \text{ kHz}$ ce qui donne une fréquence de coupure
à - 6 dB de 56 kHz, ou une fréquence de coupure à - 3 dB de
36 kHz.

La fréquence de coupure est donc suffisante.

Expérimentalement (avec un signal d'entrée carré amplitude ± 30 mV de fréquence 1 kHz) :

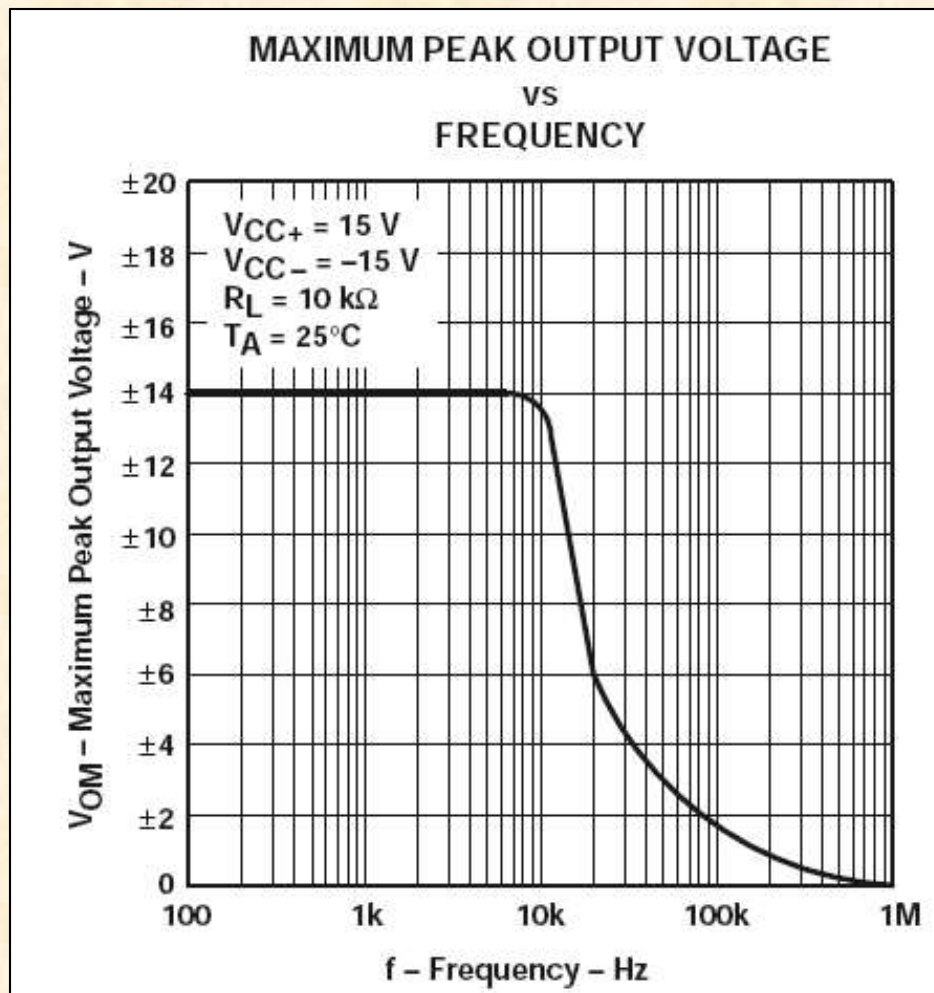


On notera cependant la présence du slew rate :

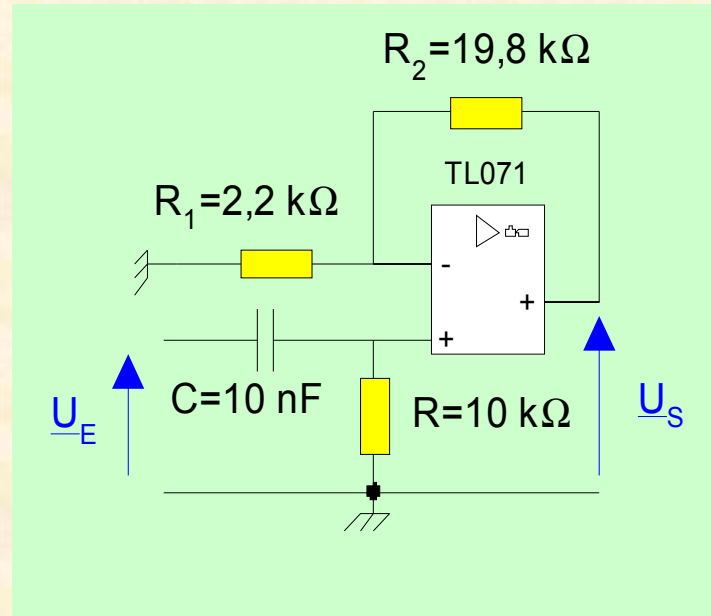


Avec un signal sinusoïdal, le slew rate n'intervient qu'à partir de 10 kHz, et à partir de 20 kHz si on se limite en sortie à des signaux d'amplitude ± 6 V (ce qui revient à limiter l'amplitude des signaux d'entrée à ± 19 mV) :

μ A741



• **Exercice 3** : filtre passe-haut à TL071



3-1- En supposant que l'A.O. est parfait, déterminer la fonction de transfert du filtre.

En déduire l'expression de la fréquence de coupure.

A.N. $R = 10 \text{ k}\Omega$ et $C = 10 \text{ nF}$

3-2- Justifier qu'en réalité ce circuit est un filtre passe-bande.

Calculer la fréquence de coupure haute.

Réponse

3-1-

- Fonction de transfert

$$\underline{T}(\omega) = \frac{\underline{U}_S}{\underline{U}_E} = \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 - \frac{j}{RC\omega}}$$

- Fréquence de coupure à -3 dB

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$\text{A.N. } f_c = 1,6 \text{ kHz}$$

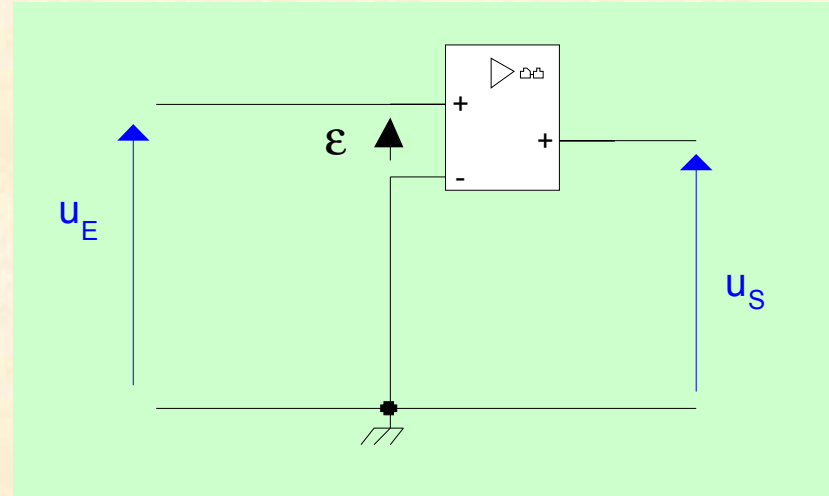
3-2- Amplification en boucle fermée :

$$A = 1 + R_2/R_1 = 10$$

Fréquence de coupure haute : $B_1 / A = 3 \text{ MHz} / 10 = 300 \text{ kHz}$

• Exercice 4

TL071 $V_{cc\pm} = \pm 15 \text{ V}$
tension de seuil : 0 V



En entrée, sinus d'amplitude $\pm 10 \text{ V}$ de fréquence 1 kHz .

Calculer la durée de commutation de ce comparateur.

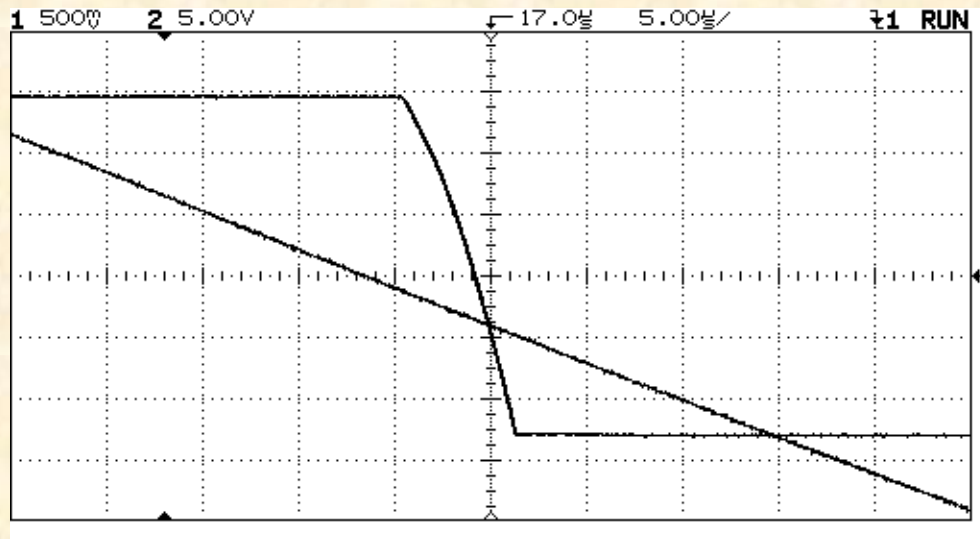
Réponse : pente du sinus à 0 V = $2\pi \times 1000 \times 10 = 62,8 \text{ kV/s}$

$$\frac{(13 \cdot 10^6)^2}{4\pi \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot 27} = 166 \text{ kV/s}$$

Pas de slew rate car $62,8 \text{ kV/s} < 166 \text{ kV/s}$

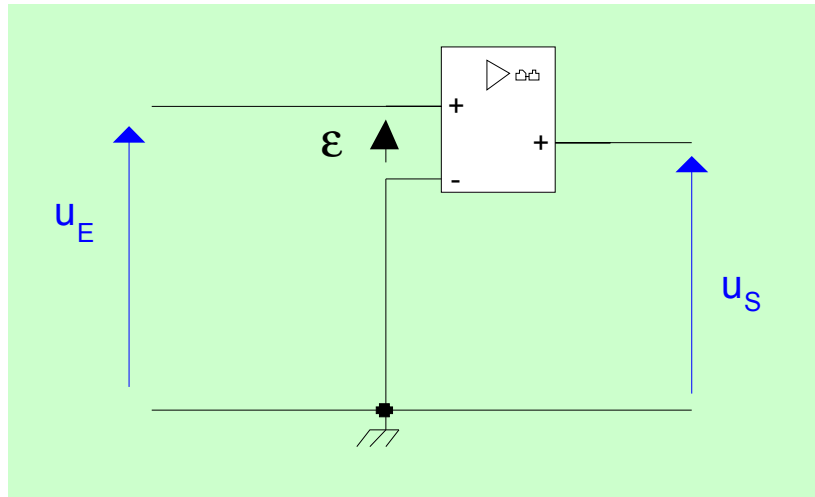
$$t_c = \sqrt{\frac{27}{\pi \cdot 62800 \cdot 3 \cdot 10^6}} = 6,8 \mu\text{s}$$

- Durée de commutation mesurée : $7,5 \mu\text{s}$



Annexe A : Calcul de la durée de commutation du montage comparateur à un seuil

- La fonction de transfert du montage s'écrit :



$$\underline{T} = \frac{\underline{U}_S}{\underline{U}_E} = \frac{A_o}{1 + j \frac{\omega}{\omega_o}}$$

On s'intéresse à ce qui se passe pendant la commutation, c'est-à-dire quand la sortie bascule de V_{sat-} à V_{sat+} et vice versa.

- Pendant la commutation, on considère que l'A.O. est en régime linéaire.

On note **a** la pente (en V/s) du signal d'entrée pendant la commutation (pente supposée constante).

On admet que la réponse à une rampe ($u_E(t < 0) = 0$, $u_E(t \geq 0) = at$) d'un système du premier ordre est :

$$u_S(t) - u_S(t = 0) = aA_O (t - \tau(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}))$$
$$\text{avec : } \tau = \frac{1}{2\pi f_O} = \frac{A_O}{2\pi B_1}$$

Pour le $\mu A741$:

$$\tau = \frac{1}{2\pi \cdot 5} \approx 32 \text{ ms}$$

En pratique, la durée de commutation t_c est très inférieure à τ .

On sait que pour $x \ll 1$:
$$e^{-x} \approx 1 - x + \frac{x^2}{2}$$

Pour $t \ll \tau$:

$$e^{-\frac{t}{\tau}} \approx 1 - \frac{t}{\tau} + \frac{t^2}{2\tau^2}$$

$$u_s(t) - u_s(t=0) \approx \left(\frac{aA_o}{2\tau} \right) t^2 = (a\pi B_1) t^2$$

$$\text{pente de la sortie : } \frac{du_s(t)}{dt} \approx (2a\pi B_1) t$$

La sortie a donc une forme parabolique, avec une pente initiale nulle.

- Pendant la commutation, il n'y a pas de slew rate si :

$$(2a\pi B_1)t_C < SR \quad (1)$$

Par ailleurs :

$$u_s(t_C) - u_s(t=0) = (a\pi B_1)t_C^2 = V_{\text{sat}+} - V_{\text{sat}-} = \Delta V_{\text{sat}}$$

$$t_C = \sqrt{\frac{\Delta V_{\text{sat}}}{\pi a B_1}} \quad (2)$$

$$(1)(2) \quad a < \frac{SR^2}{4\pi B_1 \Delta V_{\text{sat}}}$$

- Il y a présence du slew rate si :

$$a > \frac{SR^2}{4\pi B_1 \Delta V_{sat}}$$

Notons t_1 , l'instant où la pente atteint SR :

$$\frac{du_s(t_1)}{dt} \approx (2a\pi B_1)t_1 = SR$$

$$t_1 \approx \frac{SR}{2a\pi B_1}$$

$$u_s(t_1) - V_{sat-} \approx (a\pi B_1)t_1^2 = \frac{SR^2}{4a\pi B_1}$$

Pendant $t_2 = t_C - t_1$, la pente est donc SR.

$$\begin{aligned}
t_C &= t_1 + t_2 = t_1 + \frac{V_{\text{sat}+} - u_S(t_1)}{SR} \\
&= \frac{SR}{2a\pi B_1} + \frac{\Delta V_{\text{sat}} - \frac{SR^2}{4a\pi B_1}}{SR} \\
&= \frac{SR}{4\pi a B_1} + \frac{\Delta V_{\text{sat}}}{SR}
\end{aligned}$$

• Durée minimale de commutation :

si a est très grand :

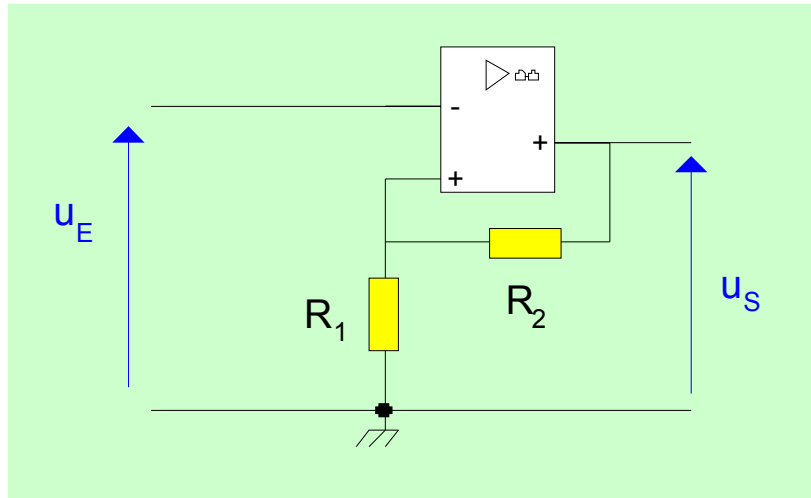
$$t_{C \text{ min}} = \frac{\Delta V_{\text{sat}}}{SR}$$

A.N. $\mu\text{A}741$ avec $SR = 0,85 \text{ V}/\mu\text{s}$ (mesuré)

$$\frac{\Delta V_{\text{sat}}}{SR} = \frac{27}{0,85 \cdot 10^6} = 31,8 \mu\text{s}$$

Annexe B

Complément sur la commutation du montage trigger inverseur



$$(1) \frac{\underline{U}_s}{\underline{\varepsilon}} = \frac{A_o}{1 + j \frac{\omega}{\omega_o}}$$

$$(2) \underline{\varepsilon} = \underline{V}_+ - \underline{V}_-$$

$$(3) \underline{V}_- = \underline{U}_E$$

$$(4) \underline{V}_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \underline{U}_s = \frac{\underline{U}_s}{A}$$

avec : $A = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

$$\Rightarrow \underline{T} = \frac{\underline{U}_s}{\underline{U}_E} = \frac{-\frac{A_o}{1 - \frac{A_o}{A}}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_o \left(1 - \frac{A_o}{A}\right)}}$$

En pratique : $A \ll A_0$

$$\Rightarrow \underline{T} = \frac{\underline{U}_S}{\underline{U}_E} \approx \frac{A}{1 + j \frac{\omega}{-\omega_0 \left(\frac{A_0}{A} \right)}}$$

La fréquence de coupure est négative ainsi que la constante de temps (ce qui traduit un système instable) :

$$\tau = - \frac{1}{\omega_0 \frac{A_0}{A}}$$

$$\Rightarrow \tau = - \frac{A}{2\pi B_1}$$

La réponse à une rampe est : $u_s(t) - u_s(t=0) = aA(t - \tau(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}))$

- Pour $t \ll |\tau|$: $u_s(t) - u_s(t=0) \approx \left(\frac{aA}{2\tau}\right)t^2 = -(a\pi B_1)t^2$

pente de la sortie : $\frac{du_s(t)}{dt} \approx -(2a\pi B_1)t$

L'allure est parabolique, avec une pente initiale nulle (réponse identique à celle du comparateur à un seuil)

- Pour $t \gg |\tau|$: $u_s(t) - u_s(t=0) \approx (aA\tau)e^{-\frac{t}{\tau}}$

L'allure est exponentielle divergente, très rapidement limitée par le slew rate.

Remarque : c'est très différent du comparateur à un seuil :

$$u_s(t \gg \tau) - u_s(t=0) \approx aA_o(t - \tau)$$

• $\mu A741$ $V_{cc\pm} = \pm 15$ V

$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$\Rightarrow A = 11$$

$$\Rightarrow \tau = -\frac{A}{2\pi B_1} = -\frac{11}{2\pi \cdot 10^6} = -1,75 \mu\text{s}$$

La durée de commutation étant au moins de $31,8 \mu\text{s}$, nous sommes dans le cas $t \gg |\tau|$:

Au départ, pente nulle et forme parabolique, puis forme exponentielle rapidement limitée par le slew rate.

C'est bien ce que l'on a en pratique.