ETUDE DE L'EFFET DOPPLER

But du T.P. :

- Mesurer une vitesse par décalage Doppler.
- Réaliser une détection synchrone.
- Mesurer la vitesse du son dans l'air.

= Appel professeur = A travailler impérativement avant le TP

I. L'EFFET DOPPLER EN MECANIQUE CLASSIQUE

1) Introduction

T.1. Donner un exemple de la vie courante où vous avez « entendu » l'effet Doppler. Le son perçu est-il plus grave ou plus aigu ? Expliquer qualitative le phénomène.

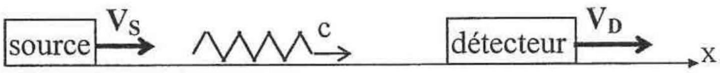
T.2. Donner au moins un exemple concret d'application de l'effet Doppler.

2) L'effet Doppler longitudinal

Une source se déplace à la vitesse $\overrightarrow{V_S} = V_S\,\overrightarrow{u_x}$ en direction du détecteur. Le récepteur s'éloigne à la vitesse $\overrightarrow{V_D} = V_D\,\overrightarrow{u_x}$ de la source. V_S et V_D sont algébriques.

La source émet un signal périodique, de période T, de fréquence $\nu = 1/T$. Le détecteur perçoit une fréquence $\nu' = 1/T'$ différente de ν.

On appelle c la vitesse de propagation du signal.



T.3. On remplace le signal périodique par une succession de "tops" séparés de T. On notera d la distance séparant la source du détecteur à t = 0.

Le premier top émis à l'instant $t = 0$ arrive au détecteur à l'instant $t_1 =$
Le deuxième top émis à l'instant $t = T$ arrive au détecteur à l'instant $t_2 =$

En déduire que $\boxed{\nu' = \dfrac{1-\frac{V_D}{c}}{1-\frac{V_S}{c}}\,\nu}$.

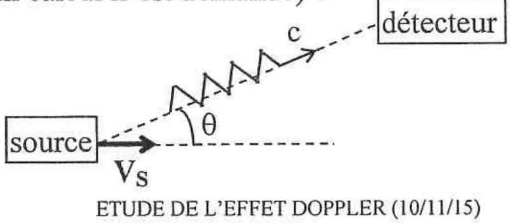
T.4. Montrer que pour $V_D \ll c$ et $V_S \ll c$, la relation fondamentale de l'effet Doppler est :

$$\boxed{\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\nu'-\nu}{\nu} = \frac{V_S - V_D}{c}}$$ donc seule la vitesse relative intervient.

Comment la fréquence est-elle modifiée selon que la source se rapproche ou s'éloigne du détecteur ? Est-ce conforme à vos observations du 1) ?

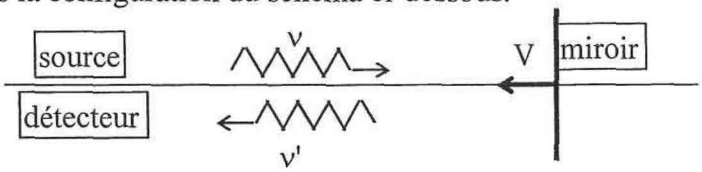
Noter que la variation de fréquence est due à la variation de la distance entre source et détecteur.

T.5. Supposons le détecteur fixe et la vitesse de déplacement de la source (faible devant c) faisant un angle θ avec la direction de propagation de l'onde, que devient la variation relative de fréquence (aucun calcul n'est demandé) ?



3) Cas de la réflexion sur un miroir mobile

On souhaite mesurer le décalage Doppler dans le cas d'une onde se réfléchissant sur un miroir mobile qui se rapproche à la vitesse algébrique V de l'ensemble émetteur / détecteur fixe et placés dans la configuration du schéma ci-dessous.



T.6. En admettant que la réflexion s'effectue sans changement de fréquence dans le référentiel du miroir, montrer que $\nu' = \frac{1+\frac{V}{c}}{1-\frac{V}{c}}\,\nu$. En déduire $\Delta\nu/\nu$ dans le cas où $V \ll c$.

4) Ordres de grandeur

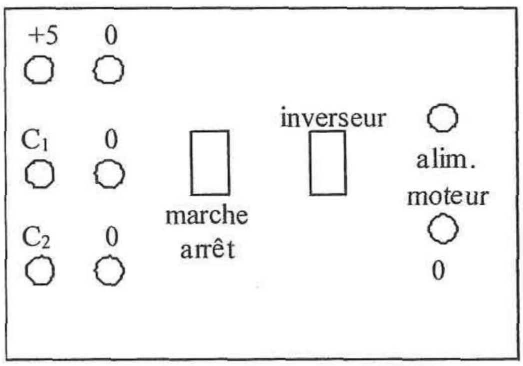
T.7. Donner un ordre de grandeur de $\Delta\nu$ pour une échographie Doppler (mesure de la vitesse des globules rouges dans les vaisseaux) et un radar routier.

Conclusion : Vous devez constater que $\Delta\nu \ll \nu$, donc que la mesure du décalage Doppler ne peut pas s'effectuer par la mesure directe de ν et ν'. Il faudra donc construire un signal dont une composante spectrale est à la fréquence $\Delta\nu$ et mesurer directement cette grandeur.

T.8. L'opération permettant d'obtenir le signal à $\Delta\nu$ est-elle ou non linéaire ? Quelle est l'opération la plus simple permettant cela ? Quel est le spectre du signal obtenu par cette opération ?

II. MESURE DE LA VITESSE DU SON DANS L'AIR

1) Principe de la mesure de la vitesse du miroir



Le moteur est alimenté par une tension continue comprise entre 0 et 15 V.

Les photocellules C_1 et C_2 sont alimentées simultanément en 5 V continu.

Les tensions C_1 et C_2 délivrées par les cellules sont observées à l'oscilloscope numérique Agilent.

Pour mesurer la vitesse du chariot, on mesure le temps Δt séparant les deux impulsions données par les cellules distantes de d. Noter que, pour une tension d'alimentation donnée, la vitesse du chariot n'est pas forcément la même dans les deux sens.

Test :

P.1. Mesurer d avec son incertitude.

- Alimenter les photocellules. Récupérer le signal à l'oscilloscope.
- Alimenter le moteur en 12 V.
- Vérifier le déplacement du chariot dans les deux sens (utiliser l'inverseur).
- Ajuster les calibres de l'oscilloscope pour obtenir les 2 signaux des photocellules. On se placera ensuite en mode Single pour ne pas avoir à gérer l'arrêt de cet oscilloscope pendant les mesures.

2) Nature de l'onde

On étudie l'effet Doppler pour des ondes ultrasonores. L'émetteur et le récepteur sont des transducteurs électromécaniques, en l'occurrence ici des quartz piézoélectriques.

- Placer face à face l'émetteur et le récepteur.
- Relier le récepteur à un deuxième oscilloscope, alimenter l'émetteur par un signal sinusoïdal d'amplitude 5 V et rechercher la fréquence au voisinage de 40 kHz qui optimise l'amplitude du signal reçu.
- Placer l'émetteur et le récepteur cote à cote face au miroir mobile. Comparer les amplitudes des ondes incidentes et réfléchies.
- Noter la très grande sensibilité aux vibrations de la plaque du signal réfléchi : chariot fixe, faire vibrer légèrement la plaque. Ne pas chercher à avoir un signal parfaitement sinusoïdal.

T.9. Quelles sont les causes de l'atténuation de l'amplitude de l'onde reçue par le détecteur après réflexion sur le miroir mobile ?

3) La détection synchrone

T.10. Proposer un montage permettant d'obtenir une tension à la fréquence $\Delta\nu$. Vous disposez pour cela des montages soustracteur, sommateur, multiplieur et de tous les filtres possibles.

: Soumettre ce montage à votre enseignant pour qu'il vous fournisse le matériel nécessaire

- Réaliser le montage en n'oubliant pas d'alimenter les quadripôles actifs et d'amplifier le signal réfléchi avant de l'utiliser. Choisir et placer les composants R et C du filtre. Récupérer le signal de sortie sur le deuxième oscilloscope à la place du signal d'entrée et passer en mode « défilement » dans le menu des commandes horizontales.

4) La mesure de la vitesse du son

P.2. Mesurer une dizaine de fois **dans les mêmes conditions expérimentales**, Δt (mesuré avec le premier oscilloscope) et $10/\Delta\nu$ (mesuré avec le deuxième oscilloscope). Déduire d'une étude statistique (rappel sur les incertitudes de type A en annexe), la valeur de Δt et $1/\Delta\nu$ avec leur incertitude.

Remarque : Pourquoi choisit-on de mesurer $10/\Delta\nu$ plutôt que $1/\Delta\nu$?

T.11. Calculer la vitesse du chariot et le décalage Doppler $\Delta\nu$ avec leur incertitude.

T.12. Déterminer la vitesse du son dans la salle avec son incertitude (cf polycopié sur les incertitudes et la propagation des erreurs).

T.13. Si l'on assimile l'air à un gaz parfait et qu'on suppose que la propagation du son est un phénomène adiabatique réversible, la vitesse du son vaut : $c_s = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$. Vérifier l'homogénéité de cette relation et en déduire la température de la salle.

Annexe : Incertitudes de type A

Soit une série de N mesures de x, notée $\{x_i\}$, la meilleure estimation de la valeur vraie est la valeur moyenne :

$$\boxed{\bar{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i}$$

La meilleure estimation de l'écart-type σ est :

$$\boxed{\sigma_{\exp} = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}}$$

Ces deux grandeurs peuvent être calculées par toutes les calculatrices (menu statistique).

L'écart type associé à la distribution de la valeur moyenne est :

$$\boxed{\sigma_m = \frac{\sigma_{\exp}}{\sqrt{N}}}$$

Ainsi, la valeur vraie du mesurande a :

- une probabilité de 68% de se trouver dans l'intervalle $[\bar{x}-\sigma_m,\ \bar{x}+\sigma_m]$ **(incertitude type)**
- une probabilité de 95% de se trouver dans l'intervalle $[\bar{x}-2\sigma_m,\ \bar{x}+2\sigma_m]$ **(incertitude-type élargie)**

Complément : Effet Doppler avec des ondes électromagnétiques

S'il vous reste du temps, vous pouvez de même mesurer la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le domaine des hyperfréquences mais attention, le détecteur n'est plus linéaire mais quadratique moyen (comme en optique).

1) Principe de la mesure

Nature de l'onde :

Cette nouvelle série de mesure sera effectuée avec une onde électromagnétique dans le domaine des hyperfréquences, de fréquence ν = 10,522 GHz à 3.10^{-5} près. On assimilera l'air à du vide.

T.14. Vérifier qu'à l'échelle de notre expérience, on doit bien tenir compte de la propagation de l'onde c'est-à-dire que l'on n'est pas dans l'approximation des régimes quasi stationnaires.

L'émetteur :

L'émetteur est une diode Gunn placée dans une cavité résonante et couplée à un guide d'onde. L'extrémité du guide d'onde débouche sur un cornet destiné à transformer l'onde en onde quasi plane. L'onde est polarisée : $\vec{E}$ est parallèle au petit côté du guide.

Le récepteur :

La partie réceptrice se réduit à une diode Schottky placée sur le bord du guide parallèlement au champ électrique (le guide et le cornet fonctionnent dans les deux sens).

La diode est sensible à la fois au champ émis (ou champ incident d'amplitude E_i) et au champ reçu (ou champ réfléchi d'amplitude E_r). C'est un récepteur de type "Détecteur somme quadratique moyen". On admettra que le temps d'intégration θ du détecteur est de l'ordre de la microseconde

La tension délivrée par la diode est donc proportionnelle à :

$$\begin{aligned}
<(\vec{E_I}\cos(2\pi\nu t) + \vec{E_r}\cos(2\pi(\nu+\Delta\nu)t+\phi))^2>_\theta &= (\vec{E_I}^2 + \vec{E_r}^2)/2 + 2\,\vec{E_I}.\vec{E_r} <\cos(2\pi\nu t)\cos(2\pi(\nu+\Delta\nu)t+\phi)>_\theta \\
&= (\vec{E_I}^2 + \vec{E_r}^2)/2 + \vec{E_I}.\vec{E_r} <\cos(2\pi(2\nu+\Delta\nu)t+\phi) + \cos(2\pi\Delta\nu t+\phi)>_\theta \\
&= (\vec{E_I}^2 + \vec{E_r}^2)/2 + \vec{E_I}.\vec{E_r}\cos(2\pi\Delta\nu t+\phi) \quad \text{car} \quad 1/\nu \ll \theta \ll 1/\Delta\nu
\end{aligned}$$

Pour déterminer $\Delta\nu$, on enregistrera le signal en mode « défilement » sur le deuxième oscilloscope. On mesurera alors la durée d'une dizaine de périodes.

2) Mesures

P.3. Reprendre la mesure de Δt (mesuré avec le premier oscilloscope) et $10/\Delta\nu$ (mesuré avec le deuxième oscilloscope). En déduire la vitesse de propagation des ondes.

MAJESTÉ
Justine

94/

TP : • Oscillateur quasi-sinusoïdal
Application au laser
• Etude de l'effet Doppler

Etude de l'Effet Doppler

I -

T1/ Passage d'une ambulance sirène allumée : plus elle s'approche de nous plus la fréquence entendue augmente.
Passage d'une voiture de course.
voiture qui klaxonne continument en avançant

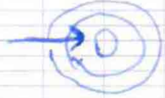
Le son perçu ~~lorsque~~ la source s'approche de nous immobile est plus aigu, lorsqu'elle s'éloigne : le son perçu est plus grave.

Explication avec analogie du cygne sur l'eau

cygne

surface de l'eau avec vague qui se propage

→ En avançant vers les vagues le cygne va "recevoir" plus de vague en une même durée que s'il était immobile.



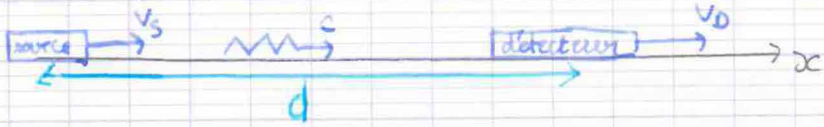
La periode entre 2 max (max des vagues) va donc diminuer et donc la fréquence ↗.

Phénomène inverse quand on s'éloigne : on perçoit moins de max de vagues que si on était immobile.

T ↗ donc f ↘

Utilisation
T2) Effet Doppler : - Radar routier
- médecine (pression sanguine)

T3) $\boxed{t=0}$



source émet une succession de "taps" séparés de T.

1er top émis à $t=0$
2ème top émis à $t = T$

1er top arrive au détecteur à $t_1 = ?$

distance parcourue par le 1er top : $\boxed{d' = d + v_D t_1}$
et aussi $\boxed{d' = c t_1}$ (le signal se déplace à vitesse c)

$$c t_1 = d + v_D t_1 \Rightarrow \boxed{t_1 = \frac{d}{c - v_D}}$$

$\boxed{t = T}$

2ème top arrive au détecteur à $t_2 = ?$:

nouvelle distance parcourue $d'' = c(t_2 - T)$

$$\text{et } d'' = \underbrace{d + (v_D T - v_S T)}_{\text{nouvelle distance entre récepteur et source à } t = T} + \overbrace{v_D(t_2 - T)}^{\text{distance parcourue par le récepteur pendant la propagation du signal.}}$$

$$c(t_2 - T) = d + T(v_D - v_S) + v_D(t_2 - T)$$

$$t_2(c - v_D) = d + cT + T(v_D - v_S) - v_D T$$
$$= d + T(c + v_D - v_S - v_D)$$
$$= d + T(c - v_S)$$

$$t_2 = T\frac{(c-v_S)}{(c-v_D)} + \frac{d}{(c-v_D)}$$

$$T' = t_2 - t_1$$

$$T' = T\frac{(c-v_S)}{c-v_D} + \frac{d}{c-v_D} - \frac{d}{c-v_D}$$

$$T' = \frac{T(c-v_S)}{c-v_D} = \frac{1-\frac{v_S}{c}}{1-\frac{v_D}{c}}\,T$$

$$\boxed{\nu' = \frac{1}{T'} = \frac{1-\frac{v_D}{c}}{1-\frac{v_S}{c}}\,\nu}$$

T4) $\nu' = \left(1-\frac{v_d}{c}\right)\left(1-\frac{v_s}{c}\right)^{-1}\nu$

$$\simeq \left(1-\frac{v_d}{c}\right)\left(1+\frac{v_s}{c}\right)\nu$$

$$\frac{\nu'}{\nu} \sim 1 + \frac{v_s - v_d}{c}$$

D'où $\boxed{\frac{\nu'-\nu}{\nu} = \frac{v_s - v_d}{c}}$

Si $v_d > v_s \rightarrow \nu'-\nu<0 \Rightarrow \nu'<\nu$

Si $v_d < v_s \rightarrow \nu'-\nu>0 \Rightarrow \nu'>\nu$

C'est conforme à nos observations du 1.

T5) La variation relative de fréquence est la même mais → un facteur $\boxed{\cos\theta}$ intervient → marge d'erreur (cf marge d'erreur radar)

T6) Le cas de la reflexion sur un miroir se deplaçant à une vitesse v équivaux aux cas où l'émetteur se rapproche du détecteur et le détecteur se rapproche de la source.
Ça équivaudrait au schema suivant :

D'après la question T3 : $\nu' = \dfrac{1+\frac{v}{c}}{1-\frac{v}{c}}\,\nu$

D'où $\dfrac{\Delta\nu}{\nu} = \dfrac{2v}{c}$ si $v \ll c$.

T7)

T8) $\Delta\nu \ll \nu$ → la mesure du décalage Doppler ne peut pas s'effectuer par la mesure directe de ν et ν'
⇒ on construit un signal dont une des composantes est à la fréquence $\Delta\nu$.

→ pour obtenir ce signal on va multiplier le signal de l'émetteur et du Récepteur.

ie : $y_1 = a\cos(x_1)\,\varepsilon\cos(x_2)$
$x_1 = 2\pi f_1$, $x_2 = 2\pi f_2$

ce qui nous interesse

$= \dfrac{a\varepsilon}{2}\left(\cos(x_1+x_2) + \cos(x_1-x_2)\right)$

on filtre ensuite le signal pour ne garder que le terme qui nous intéresse

→ comme on multiplie → opération linéaire

→ on aurait pu additionner (ie utiliser battements) ce qui serait une opération linéaire

MAIS battements marchent quand les 2 signaux ont m̂ amplitude $a \simeq \varepsilon$

OR ici ε (amplitude signal retour) est très faible devant a à cause des pertes / diffusion ds atmosphère... $y_2 = a\cos x_1 + \varepsilon \cos x_2$

$a \gg \varepsilon$ donc on ne peut pas factoriser...

2) fréquence de résonance : $f \simeq 41\ kHz$.

→ on constate que l'amplitude de l'onde réfléchie est faible devant l'amplitude incidente. → atténuation, diffusion ds atmosphère

⇒ ⚠ très grande sensibilité aux vibrations → signaux pas parfaitement sinusoïdaux.

T10) comme dit précédemment : on utilise un multiplieur, puis filtre.

→ on dispose d'une boîte de détection synchrone :

amplificateur inverseur → multiplieur → filtre passe-bas

gain x 22

⇓

afin de pouvoir utiliser le signal réfléchi

• choix et place des composants R et C du filtre :

on a un filtre passe-bas : fréquence de coupure $= \omega_c = \frac{1}{RC}$

fonction de transfert : $\underline{H}(x) = \frac{H_0}{1+jx}$; $H(j\omega) = \frac{H_0}{1+jRC\omega} = \frac{H_0}{1+j\frac{\omega}{\omega_c}}$

car on trouve un ΔV de l'ordre de 100 Hz avec ν et ν' ici et formule 13)

D'après les ODG trouvés : on coupe à $\boxed{\omega_c \simeq 100\ Hz}$

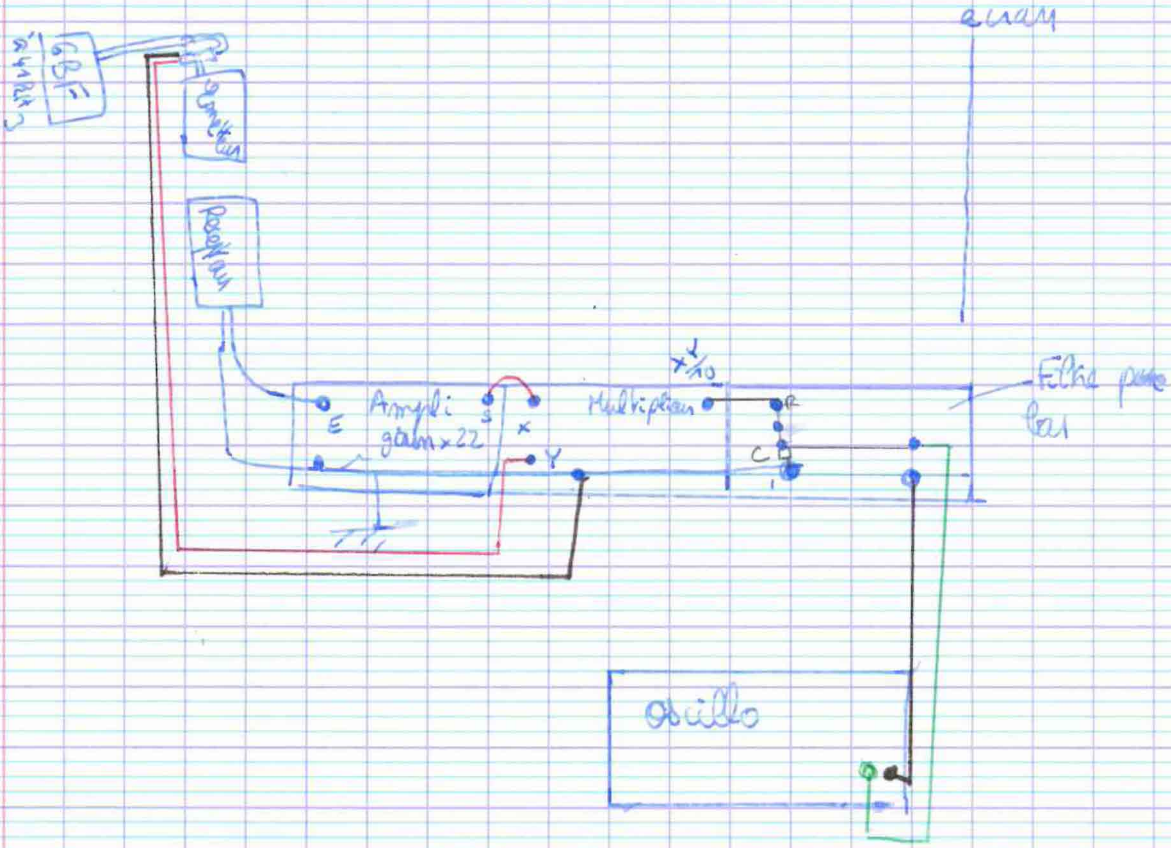
d'où $\frac{1}{RC} = 100$ ⇒ $RC = \frac{1}{100} = 10^{-2}$

On prend $C \# 10^{-6}\ F$ et $R = 10^4\ \Omega$

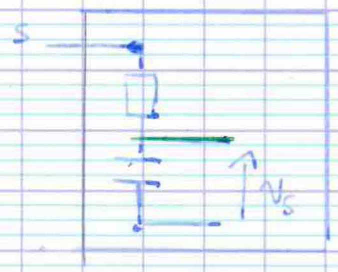
⚠ on n'oublie pas d'alimenter l'Ampli

on Récupère le signal de sortie aux bornes du condensateur.

Schema du montage :



Filtre passe bas :



R = 10 kΩ

C = 1 μF

$$\frac{\Delta v}{V} = \frac{2v}{c} \Rightarrow c = \frac{2v}{\Delta V} \cdot V$$

$$= \frac{2v \times 41.10^3}{\Delta V}$$

$$c = \frac{2 v \nu}{\Delta \nu} = \frac{2 \times 94 \cdot 10^{-2} \times 41 \times 10^{3}}{22{,}8} = 338 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$c_S = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}} \Leftrightarrow T = \frac{c_S^2 M}{\gamma^2} = 284{,}6 = 12\,°C.$$

a retrouvé à partir de Loi de Laplace $PV^{\gamma} = cste$

et expression de $\chi_S = -\frac{1}{v \frac{\partial v}{\partial p}} = \frac{1}{\rho \frac{\partial \rho}{\partial P}}$

on prend le log, on différencie