

Electronique analogique

Le diagramme de Bode en électronique



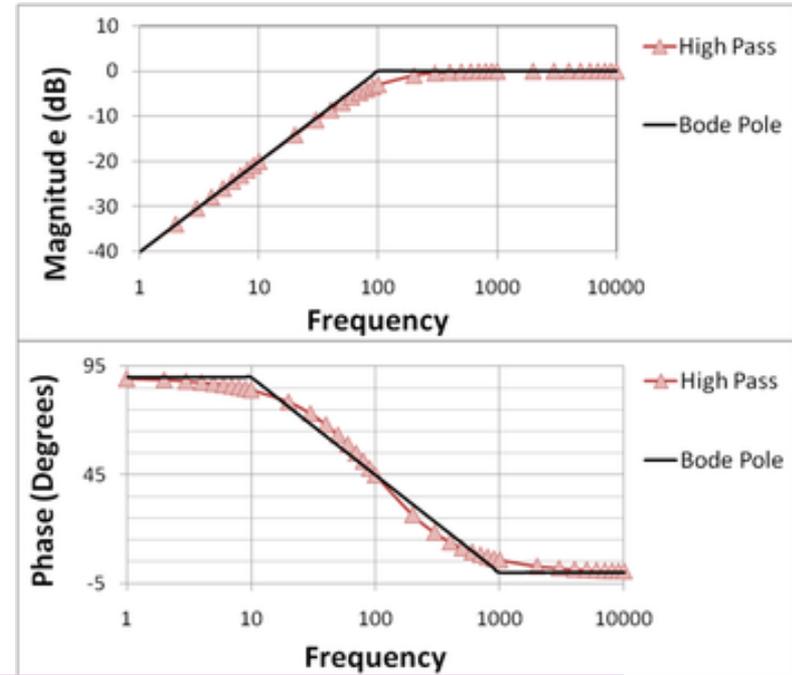
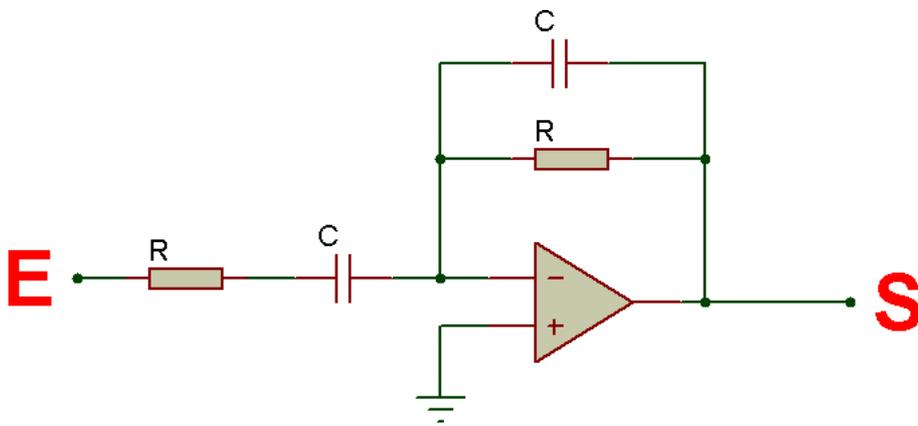
Hendrik Wade Bode (24 décembre 1905 - 22 juin 1982) est un ingénieur, chercheur et inventeur américain d'origine néerlandaise. Pionnier de la régulation moderne et des télécommunications, il a révolutionné ces domaines tant dans leurs contenus que dans leurs méthodes d'application.

Ses recherches ont eu un impact sur de nombreux autres domaines de l'ingénierie, et ont posé les fondations d'innovations récentes telles qu'ordinateurs, robots ou téléphones portables.

Reconnu depuis longtemps dans le monde scientifique, notamment pour avoir mis au point les diagrammes de Bode, une méthode de représentation de l'amplitude et de la phase d'un système.

Plan du chapitre

- Objectifs
- Généralités
- Etude de cas : sonde d'oscilloscope



Objectifs

- Savoir lire un diagramme de Bode : échelle logarithmique
- Savoir tracer un diagramme de Bode en décomposant la fonction de transfert en fonctions élémentaires du 1^{er} et 2^{ème} ordre
- Introduire la notion de filtrages

Prérequis

- Etude mathématique du diagramme asymptotique de Bode

Généralités : Liens internet

- <https://www.youtube.com/watch?v=EYZxXTYJ9sg>

A voir et revoir : excellente introduction au diagramme de Bode

<https://www.youtube.com/watch?v=J6mjzwWfVOU>

Du même auteur : comment tracer un diagramme de Bode

<http://public.iutenligne.net/electrotechnique/marty/Elec/3/31.html>

Le cours de Bode sur IUT en ligne

- <https://www.youtube.com/watch?v=DB5gvp3baOE>

Pour aller plus loin

Cette vidéo décrit les méthodes et astuces pour tracer les diagrammes de bode asymptotique en Gain et en phase. Les fonctions d'ordre 0, 1 et 2 sont exposées. Le critère d'amortissement est étudié pour comprendre quand tracer un pic de résonance.

Généralités

Le diagramme de Bode permet de représenter sous forme graphique le gain en dB ($G=20 \log |H(jw)|$) et la phase ($\varphi = \text{Arg}(H(jw))$) d'une fonction de transfert, en fonction de w . Il permet de voir le comportement d'un filtre ou d'un système asservi linéaire.

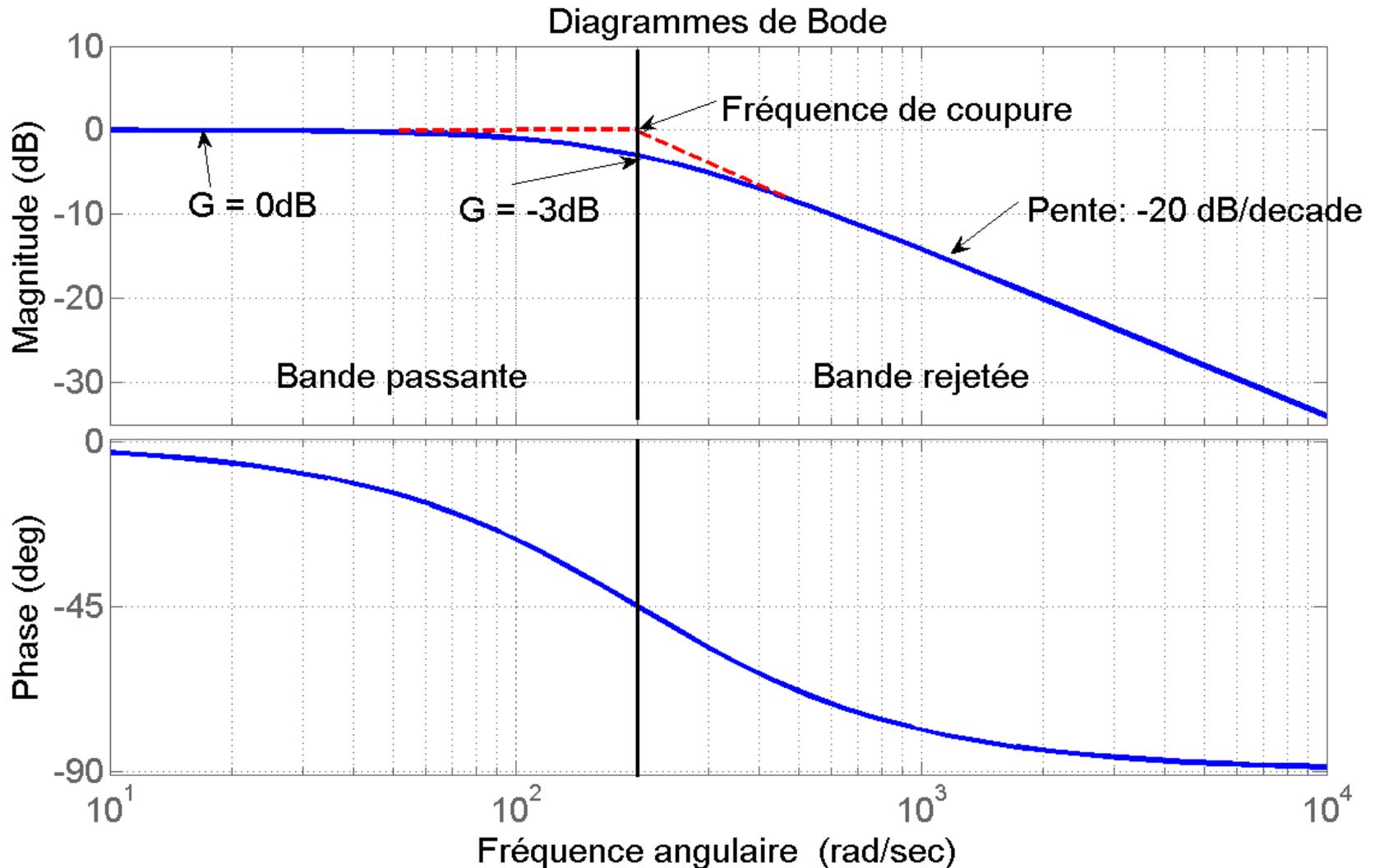
L'échelle des abscisses est logarithmique. Cela permet de représenter le gain et la phase sur une grande plage de fréquence. Ainsi, on représente : $G(w)=f(\log w)$ et $\varphi=f(\log w)$

Le tracé d'un diagramme de Bode commence par le tracé des courbes asymptotiques. (On étudie le comportement de G et φ lorsque w tend vers 0 et lorsque w tend $+\infty$.)

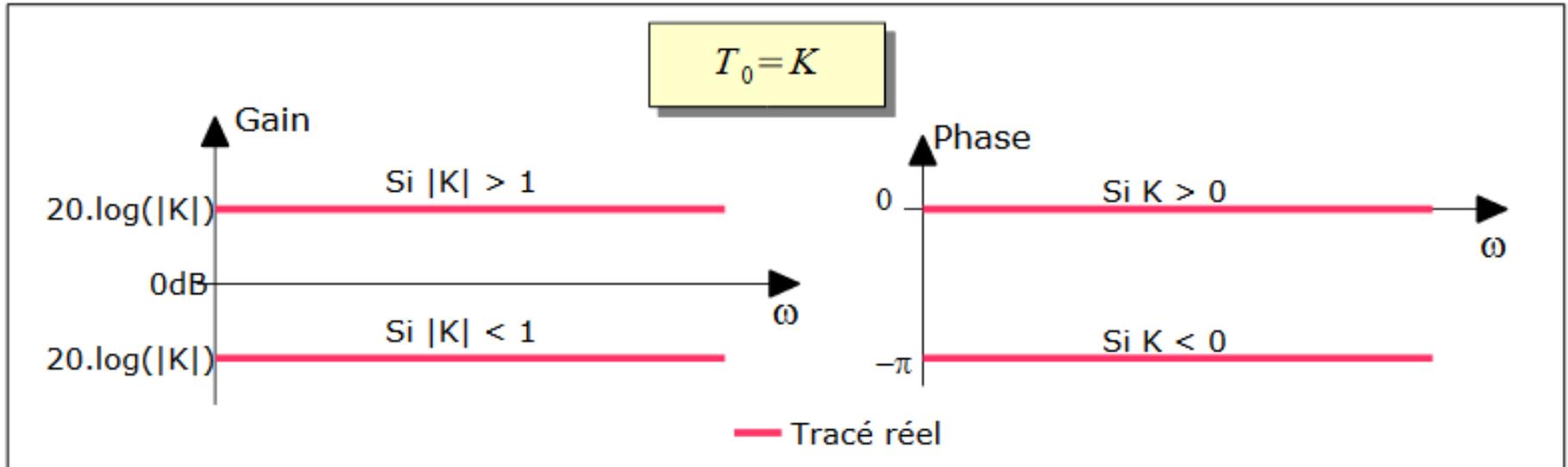
On complète ensuite par le tracé réel en marquant quelques points aux environs des jonctions entre les courbes asymptotiques.

Diagramme de Bode du filtre passe-bas passif d'ordre 1.

En pointillés rouges, l'approximation linéaire.

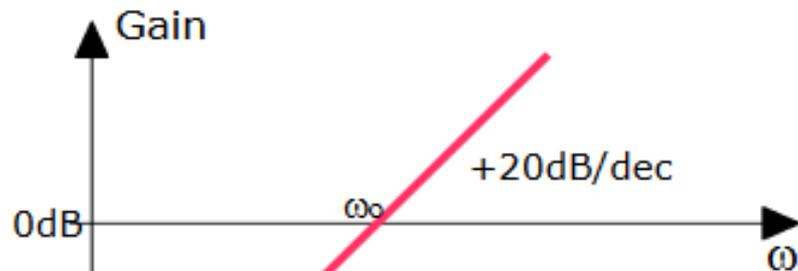


Fonctions élémentaires de Bode (1/3)



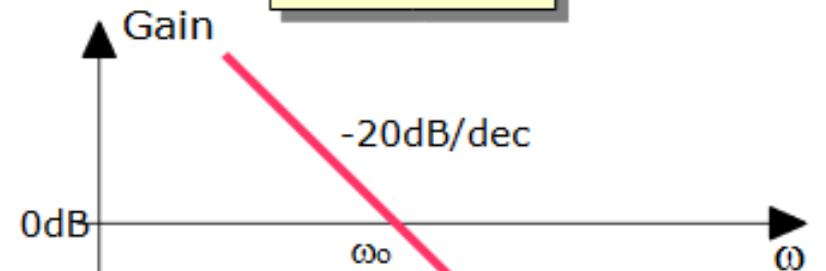
Fonctions élémentaires de Bode (2/3)

$$T_1 = \frac{j\omega}{\omega_0}$$



— Tracé réel

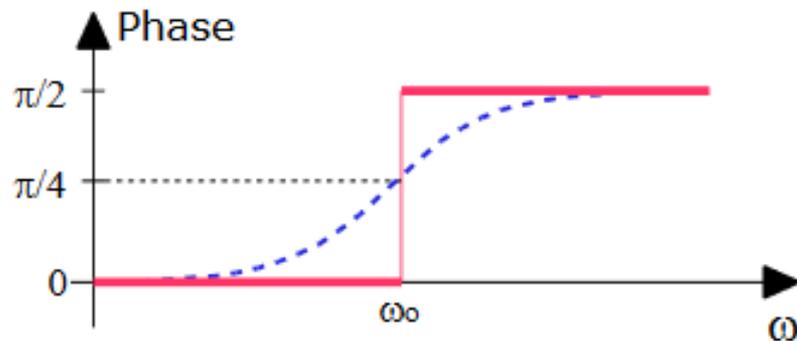
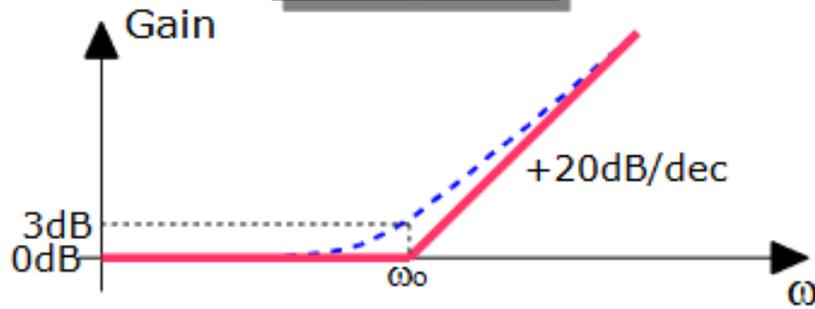
$$T_2 = \frac{1}{j\omega \omega_0}$$



— Tracé réel

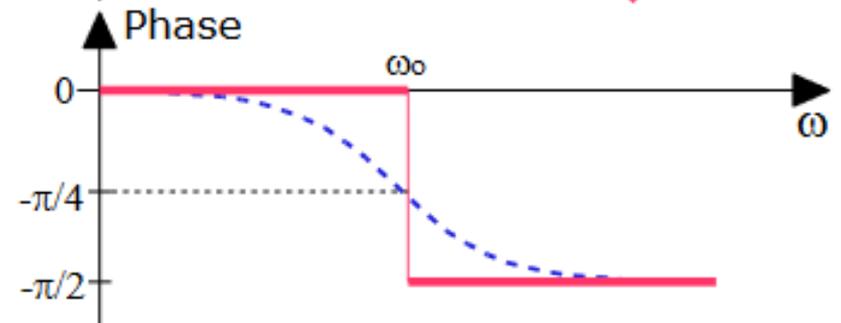
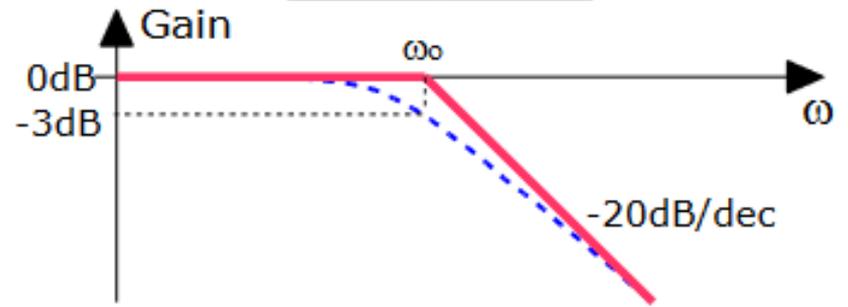
Fonctions élémentaires de Bode (3/3)

$$T_3 = 1 + \frac{j\omega}{\omega_0}$$



— Tracé asymptotique
- - - Tracé réel

$$T_4 = \frac{1}{1 + \frac{j\omega}{\omega_0}}$$



— Tracé asymptotique
- - - Tracé réel

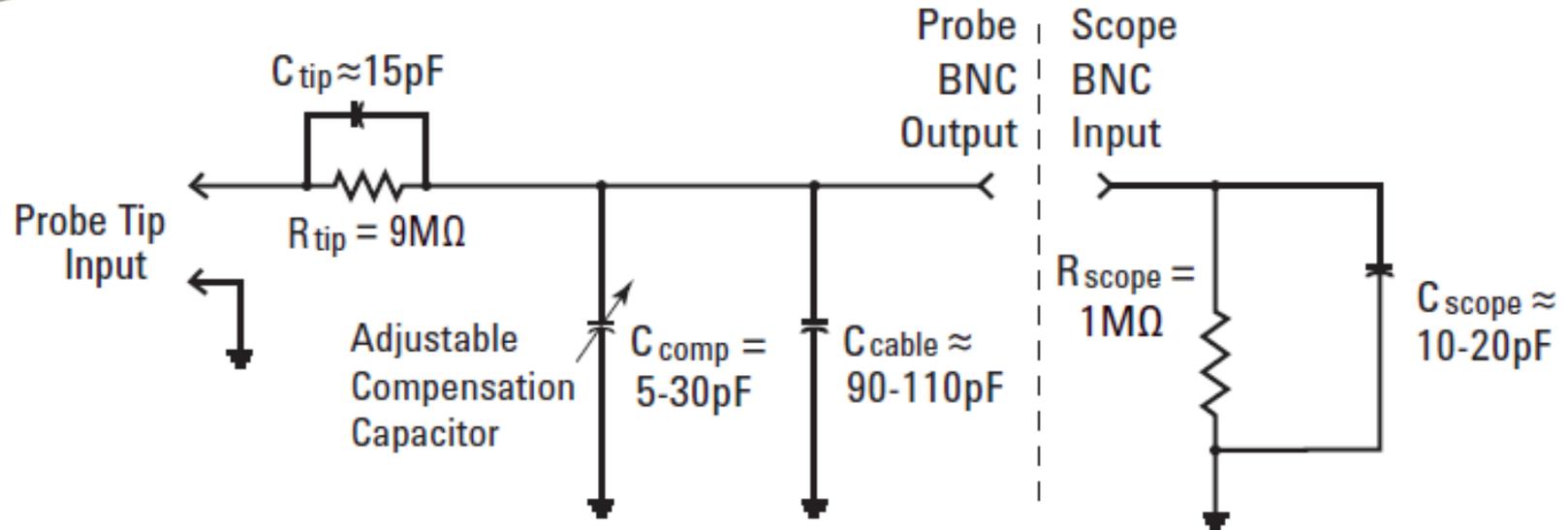
Etude de cas : sonde d'oscilloscope



A quoi servent les “sondes compensées”
sur les oscilloscopes ?



Sonde diviseuse de tension 10:1 passive



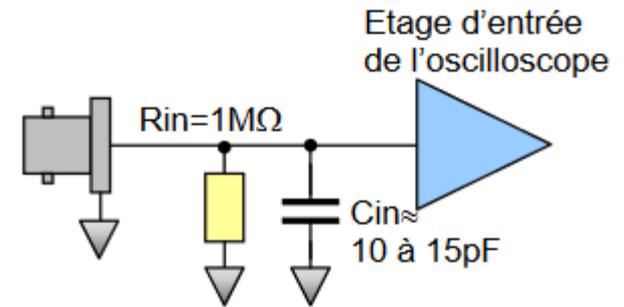
Sonde passive : ne contient aucun élément actif, tel que des transistors ou des amplificateurs.

10:1 : réduit l'amplitude du signal fourni à l'entrée BNC de l'oscilloscope selon un facteur 10. Multiplie également l'impédance d'entrée par 10.

Position du problème

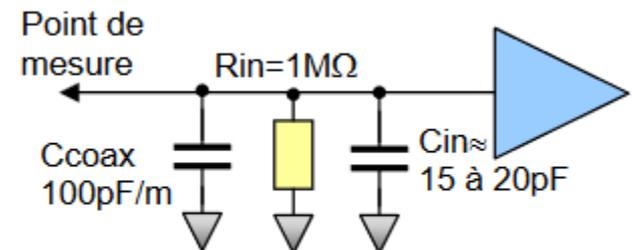
- L'impédance d'entrée de l'oscilloscope est modélisable par un circuit RC, avec typiquement $R_{in} = 1\text{M}\Omega$ et $C_{in} = 10$ à 30pF

→ Quand la fréquence augmente Z_e diminue



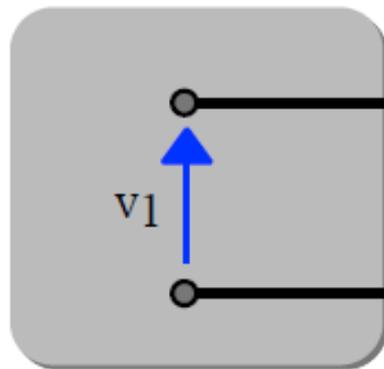
- Problème aggravé par l'utilisation d'un cordon de liaison du type « coaxial 50Ω ».

→ Un tel cordon est assimilable à un condensateur de capacité voisine de 100pF



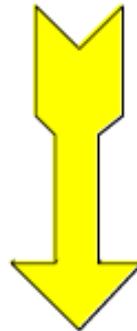
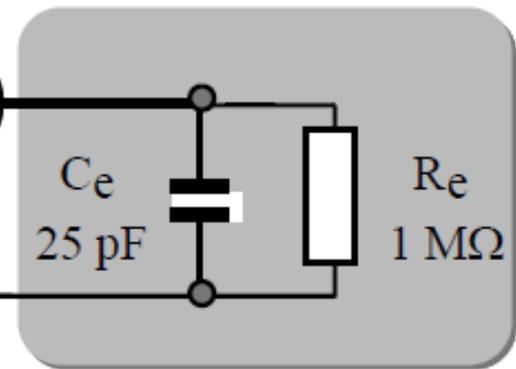
Sans sonde

Montage à mesurer

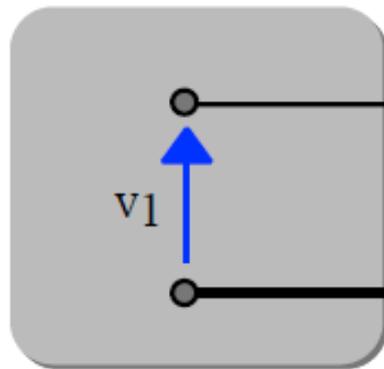


câble blindé de 1 m : $C_c = 100$ pF

Entrée de l'oscilloscope



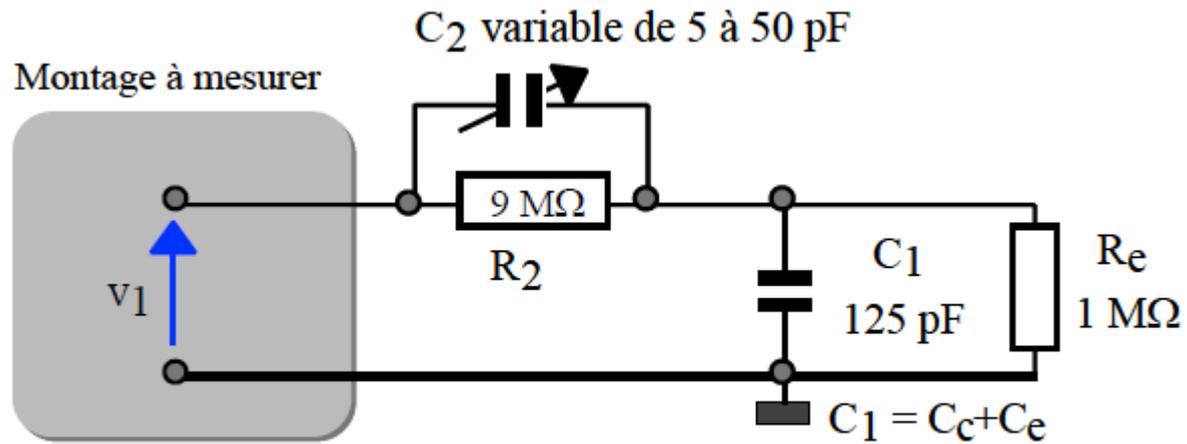
Montage à mesurer



C_1
125 pF
 $C_1 = C_c + C_e$
 R_e
1 M Ω



Utilisation d'une sonde



$$T(\omega) = \frac{R_e}{R_e + R_2} \frac{1 + j\omega R_2 C_2}{1 + j\omega (R_e \parallel R_2) (C_1 + C_2)}$$

Utilisation d'une sonde : diagramme de Bode

$$T(\omega) = \frac{R_e}{R_e + R_2} \frac{1 + j\omega R_2 C_2}{1 + j\omega (R_e // R_2) (C_1 + C_2)}$$
$$T(f) = \frac{R_e}{R_e + R_2} \frac{1 + j \frac{f}{f_{c2}}}{1 + j \frac{f}{f_{c1}}}$$

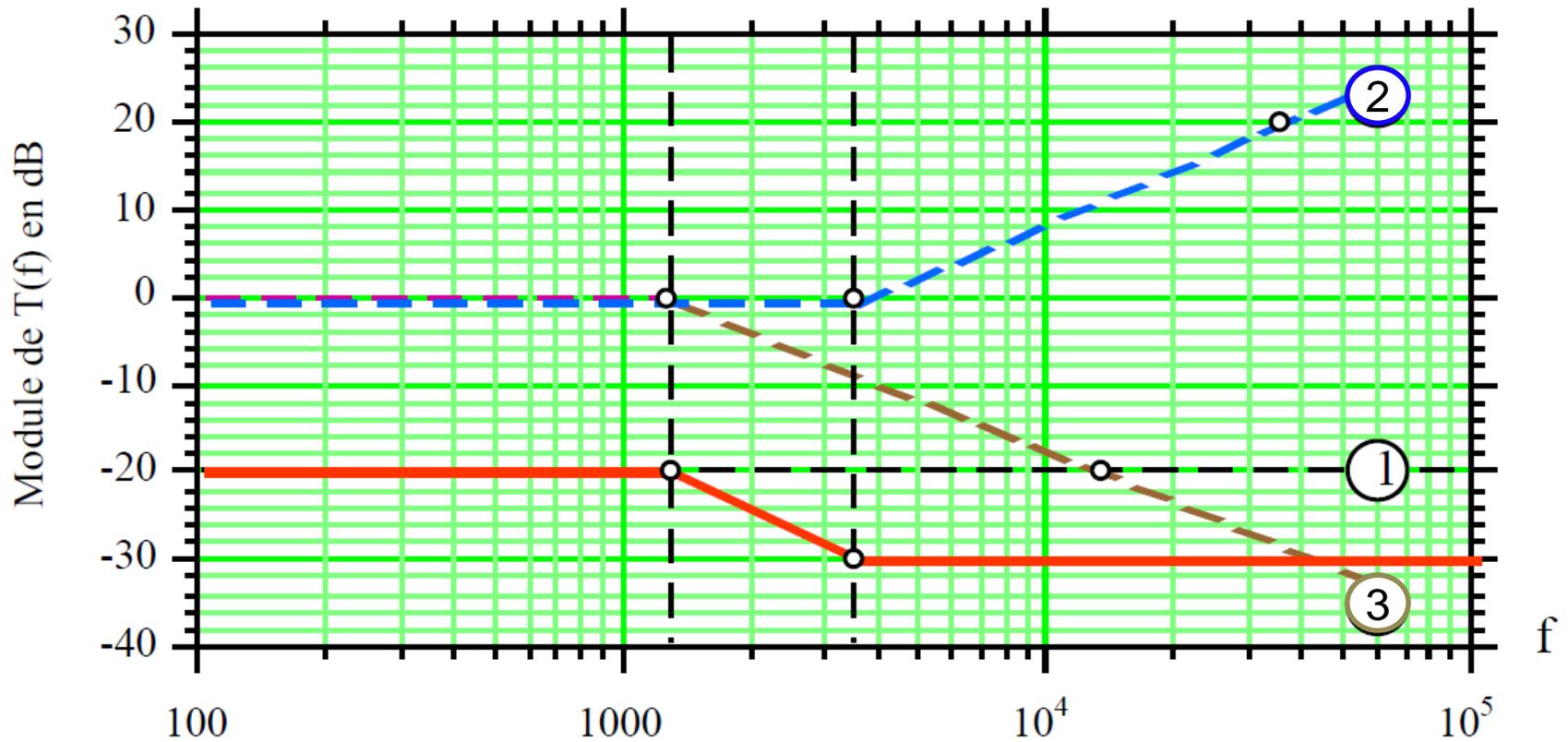
Expression du module exprimé en dB :

$$|T(f)|_{dB} = 20 \log \left(\frac{R_e}{R_e + R_1} \right) + 10 \log \left(1 + \left(\frac{f}{f_{c2}} \right)^2 \right) + \left[-10 \log \left(1 + \left(\frac{f}{f_{c1}} \right)^2 \right) \right]$$

Expression de l'argument :

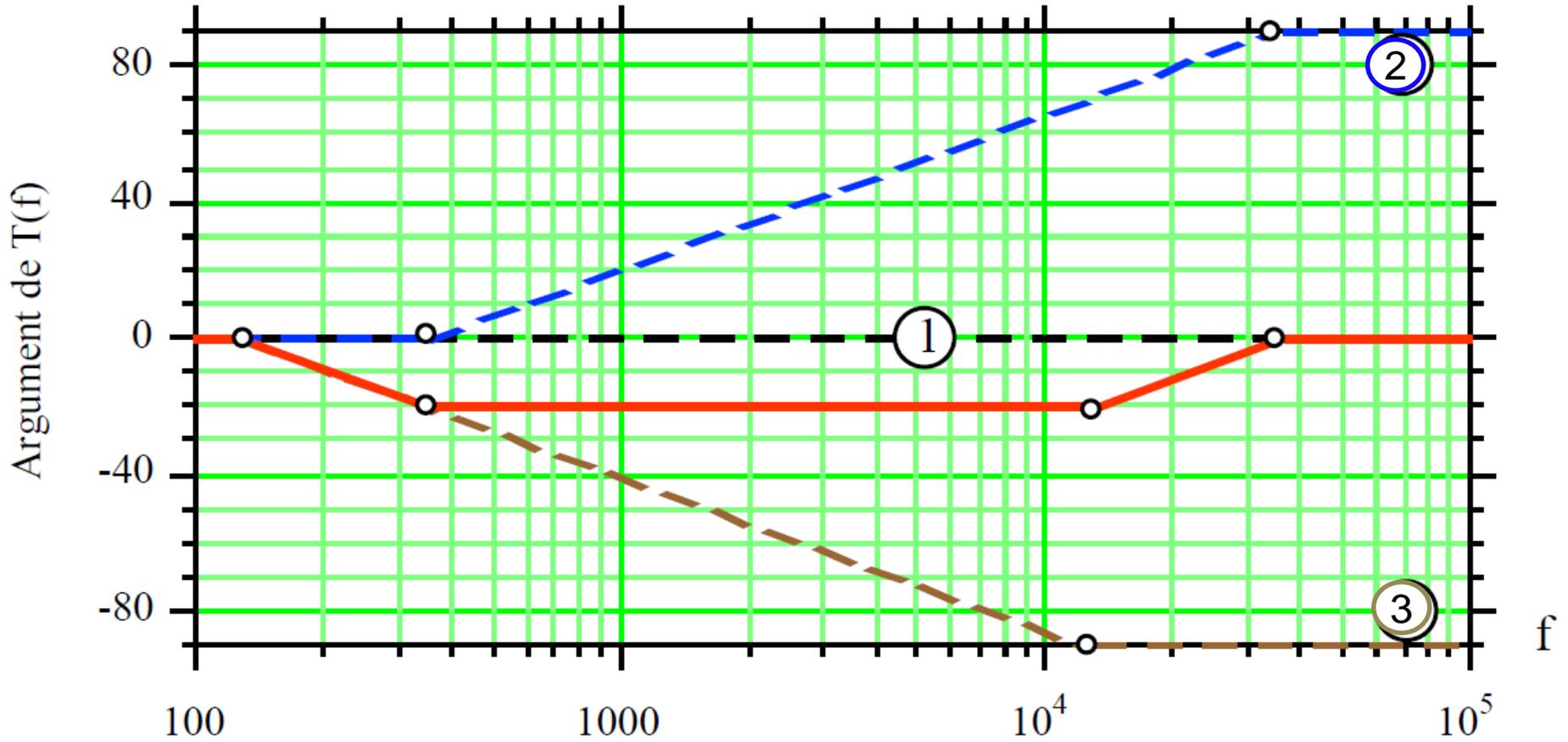
$$\Phi = 0 + \text{Arctan} \left(\frac{f}{f_{c2}} \right) + \left[-\text{Arctan} \left(\frac{f}{f_{c1}} \right) \right]$$

Sonde "sous-compensée" : module



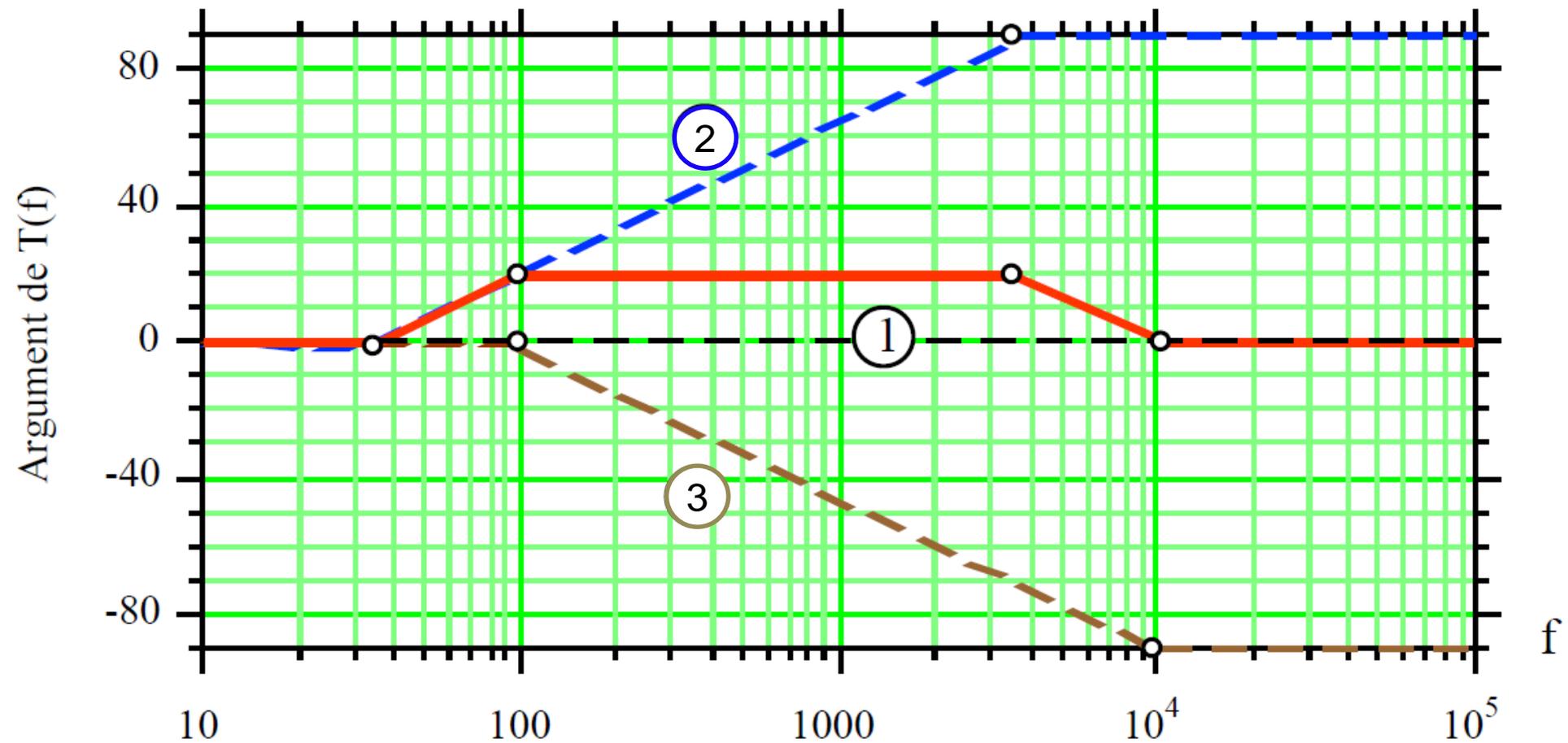
$$|T(f)|_{dB} = \underbrace{20 \log \left(\frac{R_e}{R_e + R_i} \right)}_{\text{1}} + \underbrace{10 \log \left(1 + \left(\frac{f}{f_{c2}} \right)^2 \right)}_{\text{2}} + \left[\underbrace{-10 \log \left(1 + \left(\frac{f}{f_{c1}} \right)^2 \right)}_{\text{3}} \right]$$

Sonde "sous-compensée" : argument



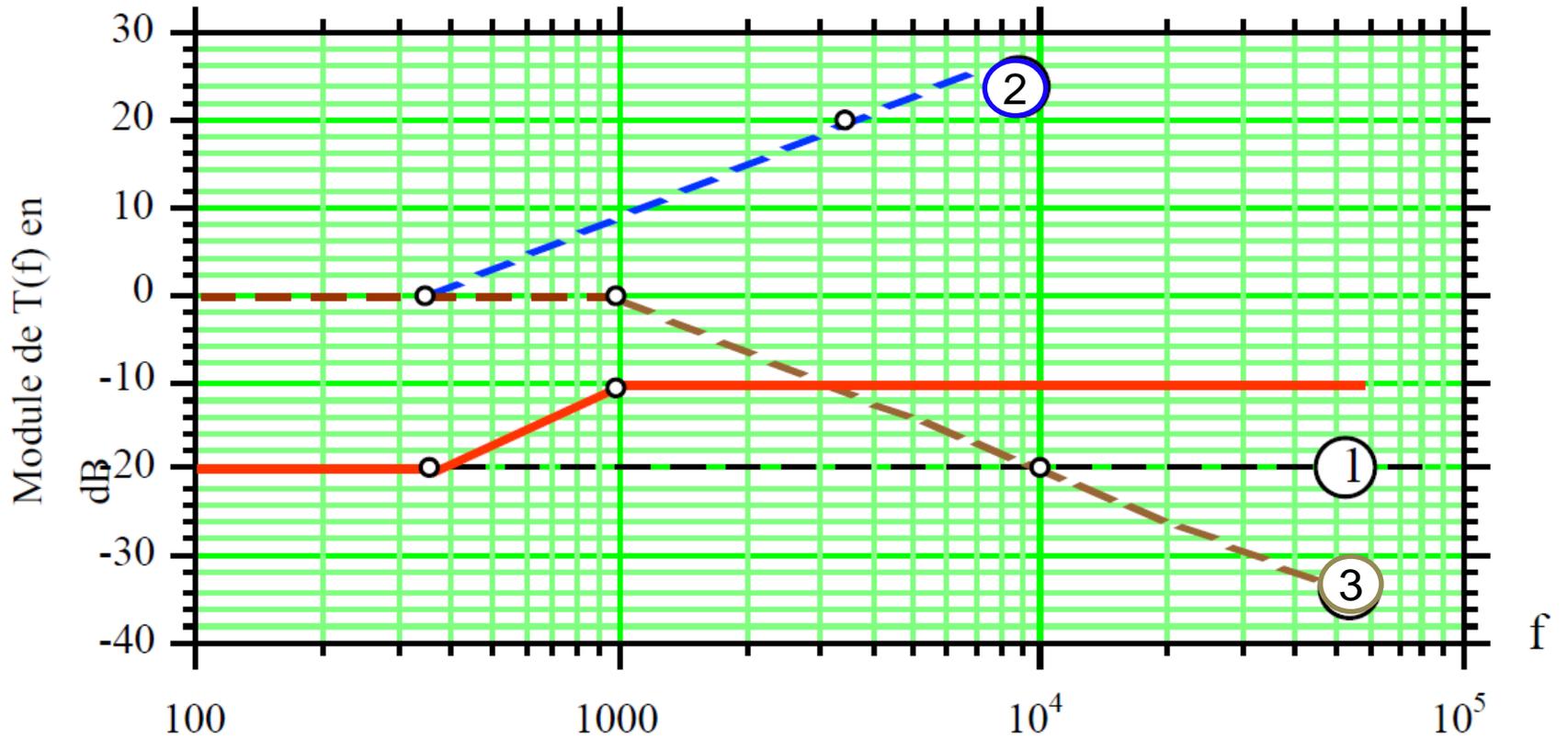
$$\Phi = 0 + \text{Arctan} \left(\frac{f}{f_{c2}} \right) + \left[-\text{Arctan} \left(\frac{f}{f_{c1}} \right) \right]$$

Sonde "surcompensée" : argument



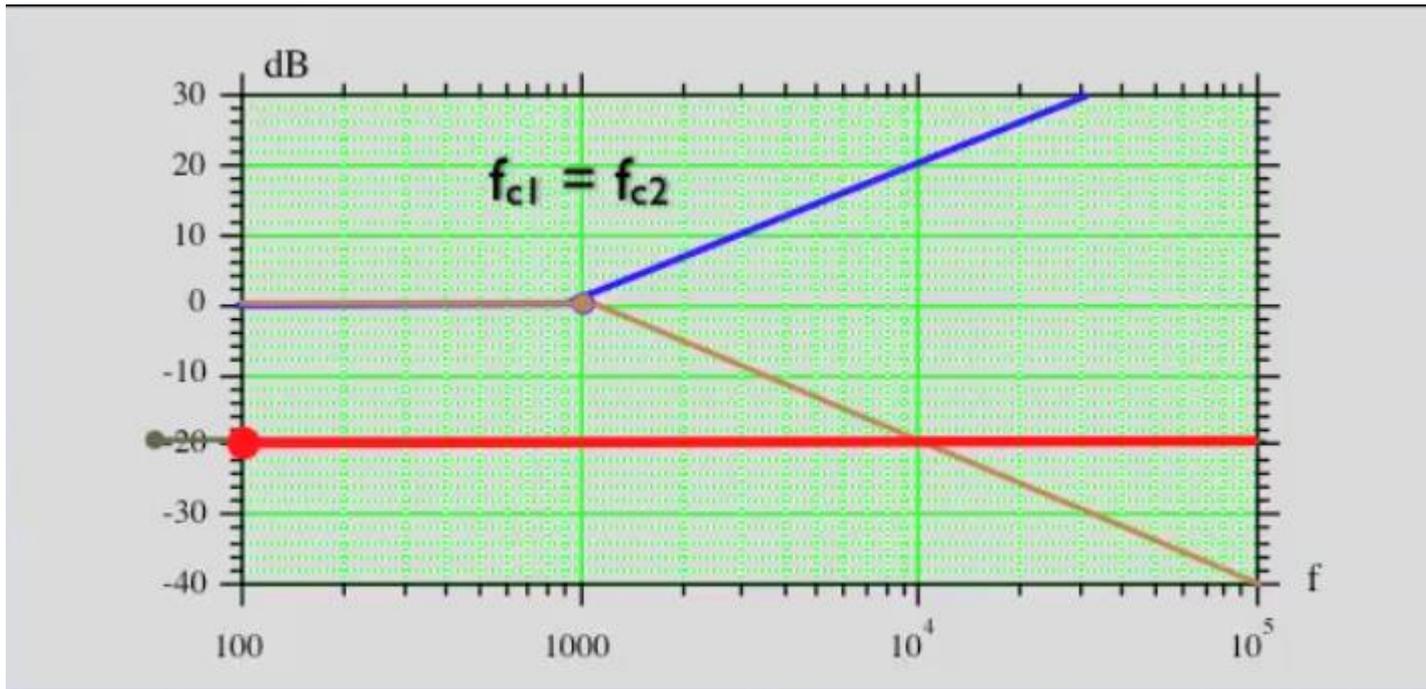
$$\Phi = 0 + \text{Arctan} \left(\frac{f}{f_{c2}} \right) + \left[-\text{Arctan} \left(\frac{f}{f_{c1}} \right) \right]$$

Sonde "surcompensée" : module



$$|T(f)|_{dB} = \underbrace{20 \log \left(\frac{R_e}{R_e + R_i} \right)}_{\text{Asymptote 1}} + \underbrace{10 \log \left(1 + \left(\frac{f}{f_{c2}} \right)^2 \right)}_{\text{Asymptote 2}} + \left[\underbrace{-10 \log \left(1 + \left(\frac{f}{f_{c1}} \right)^2 \right)}_{\text{Asymptote 3}} \right]$$

Sonde correctement réglée



En pratique

