

APP3

Modulateur FM & Boucle à verrouillage de phase (PLL).

Maxime Besacier – Sylvain Toru

E2i4 – S7

2021-2022

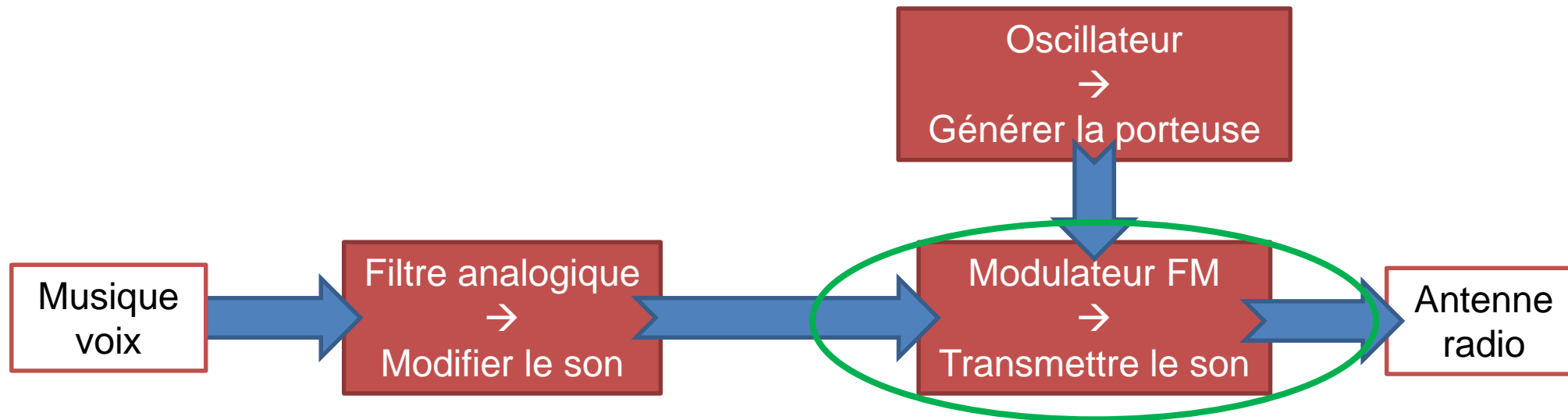


Au programme aujourd'hui

- Objectifs
- Principe général de la modulation
- Modulation FM.
- Principe général de la PLL
- Principaux constituants.

Objectifs de l'APP3

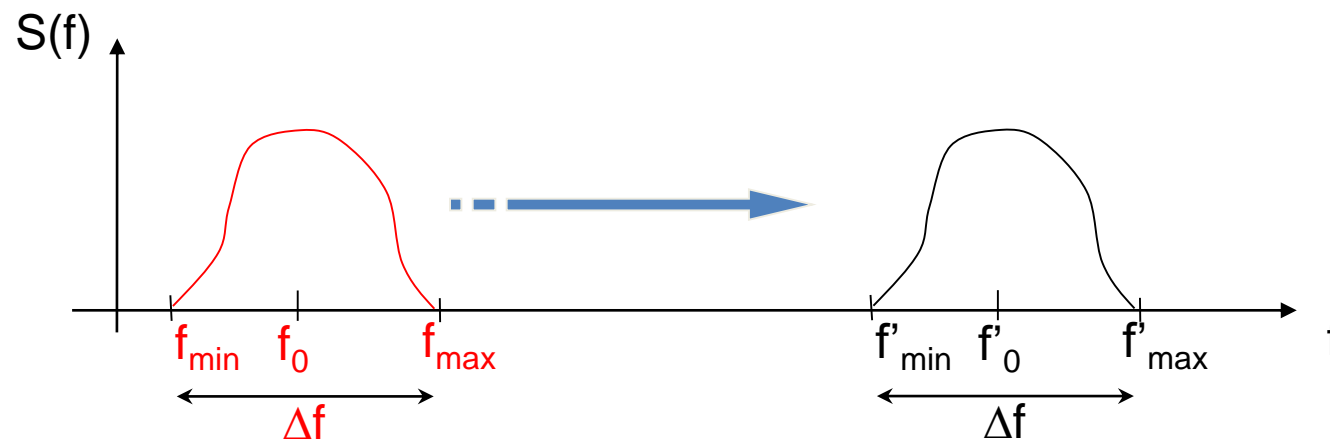
- Objectif global : construire un émetteur FM pour votre radio pirate



- Objectif de l'APP3 (**4 séances + évaluation**) : réaliser le modulateur FM (à base d'une PLL) pour transmettre le son autour de la fréquence de la porteuse.

La modulation

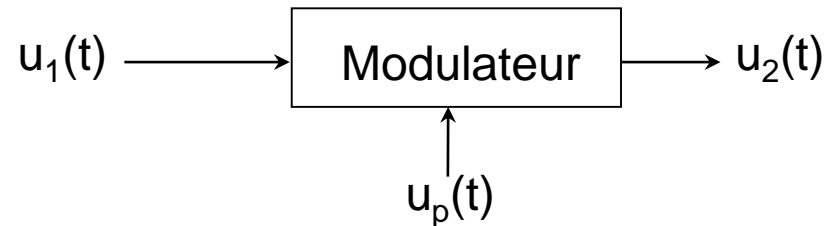
- Le principe général
 - Coder un signal (l'information) dans un autre signal (porteuse)
- Pourquoi ?
 - Décalage en fréquence du signal large bande ($\Delta f \neq f_0$) pour le transmettre en bande étroite ($\Delta f \ll f'_0$)



- **Avantage:** Multiplexage en fréquence. Décalage distinct des signaux. Pas d'interférence.

La modulation

- Le principe général - vocabulaire
- Le signal à transmettre, qui contient l'information est appelé *modulant*
- Le signal périodique, qui décale la fréquence du modulant est appelé *porteuse*.
- Le signal de sortie est quant à lui appelé *modulé*



La modulation

La porteuse est souvent sinusoïdale et s'écrit:

$$u_p(t) = U_p \cdot \cos(\omega_p t)$$

En revanche le signal modulé est quelconque. On peut quand même l'exprimer sous la forme:

$$u_2(t) = U_2(t) \cdot \cos(\varphi_2(t))$$
 L'amplitude et la phase peuvent dépendre du temps.

Rappel: $\varphi_2(t)$ est la phase instantanée du signal $u_2(t)$. La pulsation instantanée correspondante s'écrit:

$$\omega_2(t) = \frac{d\varphi_2(t)}{dt}$$

La modulation

- Le signal modulé $u_2(t)$ a 3 paramètres susceptibles de dépendre du temps, l'amplitude $U_2(t)$, la fréquence/pulsation $\omega_2(t)$ et la phase $\varphi_2(t)$.
- Le type de modulation permettra de faire varier un de ces 3 paramètres proportionnellement au *signal modulant* $u_1(t)$
- On parlera de *modulation d'amplitude* (**AM**), de *modulation de fréquence* (**FM**) ou de *modulation de phase* (**PM**)

La modulation de fréquence

- Dans ce cas, le signal modulé $u_2(t) = U_2(t) \cdot \cos(\varphi_2(t))$ s'exprime avec:

- $U_2(t) = U_p = \text{cste}$

- $\omega_2(t) = \omega_p + \Delta\omega(t)$ ($\Delta\omega(t) = k u_1(t)$: déviation en fréquence, proportionnelle à $u_1(t)$)

$$\varphi_2(t) = \int \omega_2(t) = \omega_p \cdot t + \int \Delta\omega(t) = \omega_p \cdot t + \Delta\varphi(t)$$

- On retrouve l'information du signal modulant ainsi que les grandeurs de la porteuse dans la fréquence du signal modulé.

La modulation de fréquence

$$\text{Si } u_1(t) = U_1 \cdot \cos(\Omega \cdot t)$$

$$\omega_2(t) = \omega_p + \Delta\omega \cdot \cos(\Omega \cdot t) \rightarrow \varphi_2(t) = \int \omega_2(t) \cdot dt = \omega_p \cdot t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \cdot \sin(\Omega \cdot t)$$

$$u_2(t) = U_p \cdot \cos(\omega_p \cdot t + m \cdot \sin(\Omega \cdot t))$$

$$\text{Taux de modulation « } m \text{ »: } \frac{\Delta\omega}{\Omega}$$

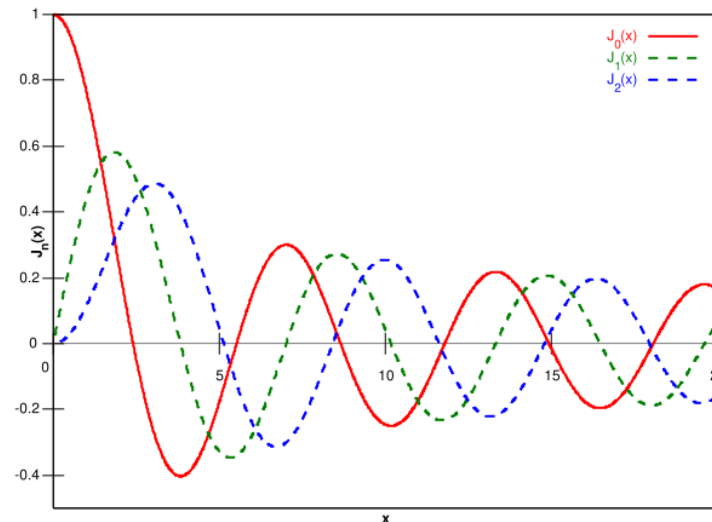
$$u_2(t) = U_p \cdot \{\cos(\omega_p \cdot t) \cdot \cos[m \cdot \sin(\Omega \cdot t)] - \sin(\omega_p \cdot t) \cdot \sin[m \cdot \sin(\Omega \cdot t)]\}$$

La modulation de fréquence

Les fonctions de Bessel

$$\cos(m.\sin(\Omega.t)) = J_0(m) + 2.J_2(m).\cos(2 \Omega.t) + 2.J_4(m).\cos(4 \Omega.t) + \dots$$

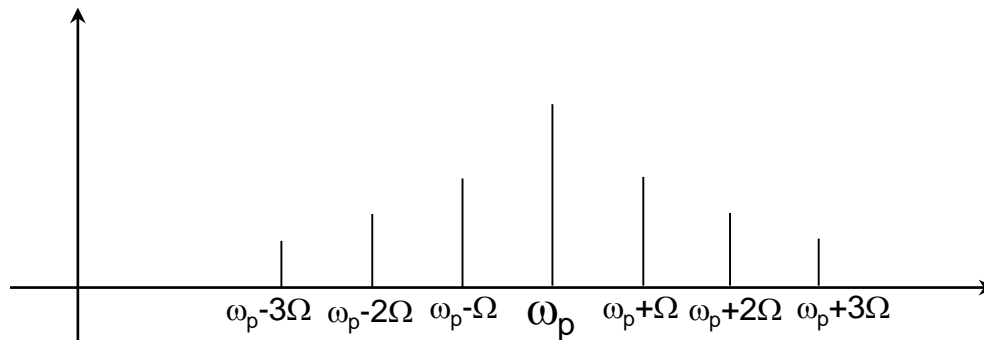
$$\sin(m.\sin(\Omega.t)) = 2.J_1(m).\sin(\Omega.t) + 2.J_3(m).\sin(3\Omega.t) + \dots$$



La modulation de fréquence

$$u_2(t) = U_p \{ J_0(m) \cdot \cos(\omega_p \cdot t) - J_1(m) [\cos((\omega_p - \Omega) \cdot t) - \cos((\omega_p + \Omega) \cdot t)] + J_2(m) [\cos((\omega_p - 2\Omega) \cdot t) + \cos((\omega_p + 2\Omega) \cdot t)] - J_3(m) [\cos((\omega_p - 3\Omega) \cdot t) - \cos((\omega_p + 3\Omega) \cdot t)] + \dots \}$$

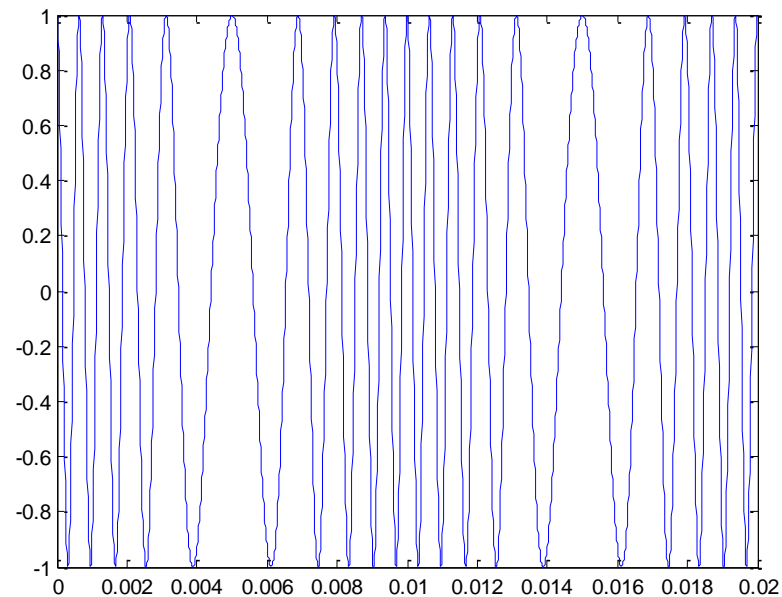
- Contenu Spectral



Le spectre est riche en harmonique mais avec des amplitudes de raies rapidement décroissantes.

La modulation de fréquence

Représentation temporelle:



$m = 6$

Fréq porteuse: 1kHz

Fréq signal: 100Hz

$U_p = 1V$

La modulation de fréquence

- Modulateur Armstrong (*utilisé pour les faibles taux de modulation*)
- *Modulateur à VCO*
- *Modulateur à PLL*

La boucle à verrouillage de phase ou PLL (Phase Locked Loop)

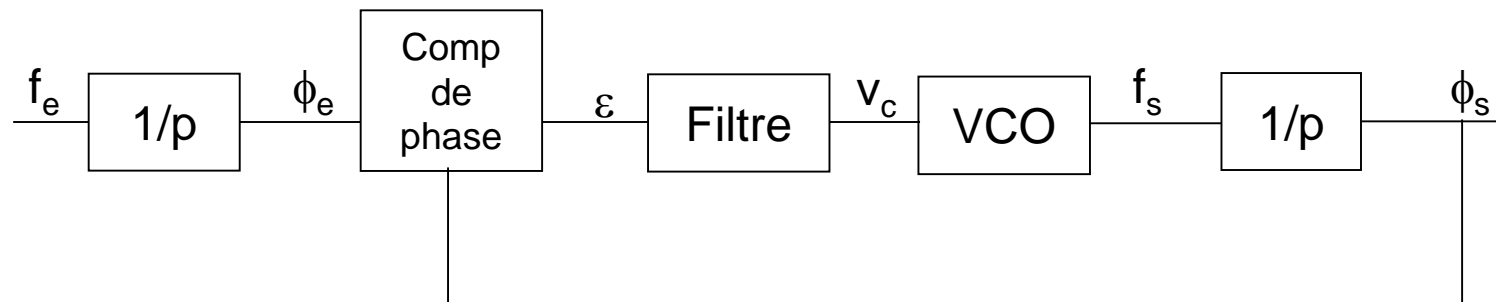
Les PLL

Système d'asservissement en fréquence (mais à partir de l'information sur la phase) d'un oscillateur (VCO) à un signal source de référence

- **Modulation/Démodulation de fréquence**
- **Synthétiseur de fréquence**
- **Retrouver un signal noyé dans du bruit**
- **Reconstitution d'un signal d'horloge**

Les PLL

- Principe de base.



Question: Pourquoi passer par la phase ?

Car il est plus facile de comparer dynamiquement la différence de phase entre 2 signaux.

Les PLL

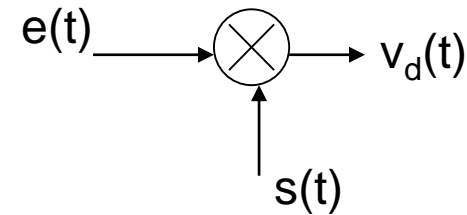
Les constituants:

Le comparateur de phase.

$v_d(t) = K[\phi_e(t) - \phi_s(t)]$ image de la différence de phase

Utilisation d'un multiplieur:

Soit $e(t) = A.\sin[\phi_e(t)]$ et $s(t) = B.\sin[\phi_s(t)]$



$$v_d(t) = e(t).s(t) = \frac{A.B}{2} \left[\underbrace{\cos[\phi_e(t) - \phi_s(t)]}_{\text{Terme utile}} - \underbrace{\cos[\phi_e(t) + \phi_s(t)]}_{\text{Terme parasite}} \right]$$

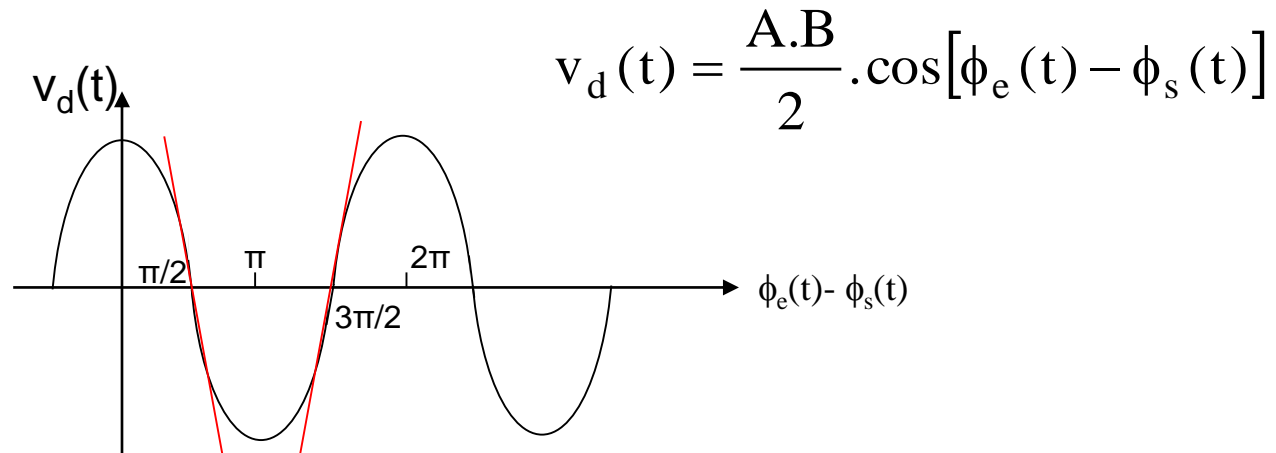
Terme utile (fonction
périodique de $\phi_e(t) - \phi_s(t)$)

Terme parasite

Les PLL

Les constituants:

Le comparateur de phase.



Dispositif non linéaire. 2 cas à prendre en compte:

$\phi_e(t) - \phi_s(t)$ varie beaucoup: asservissement non linéaire

$\phi_e(t) - \phi_s(t)$ varie peu autour de $\pi/2 + k\pi$, le comparateur est un élément linéaire.

Les PLL

Les constituants:

Le filtre de boucle.

De type passe-bas. Elimine les fréquences indésirables (terme somme du multiplieur par exemple), assure la stabilité du système.

Structure simple d'ordre 1 ou 2:

Ex:
$$F(p) = \frac{1}{1 + \frac{p}{\omega_1}} \quad (\text{Le + simple}) \quad F(p) = \frac{1 + \frac{p}{\omega_2}}{1 + \frac{p}{\omega_1}} \quad \text{avec } \omega_1 < \omega_2$$

Les PLL

Les constituants:

L'oscillateur modulable en fréquence: VCO

Délivre une fréquence qui dépend linéairement de la tension d'entrée:



Avec $\Omega_s(t) = \Omega_0 + K_{vco} \cdot v_c(t)$

Ω_0 : pulsation de repos

K_{vco} : Gain du VCO ($\text{rd.s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$)

En variable de Laplace: $\Omega_s(p) = K_{vco} \cdot v_c(p) \rightarrow$ pour la phase: $\phi_s(p) = \frac{K_{vco}}{p} \cdot v_c(p)$

Les PLL

Définition des plages de capture et des plages de verrouillage

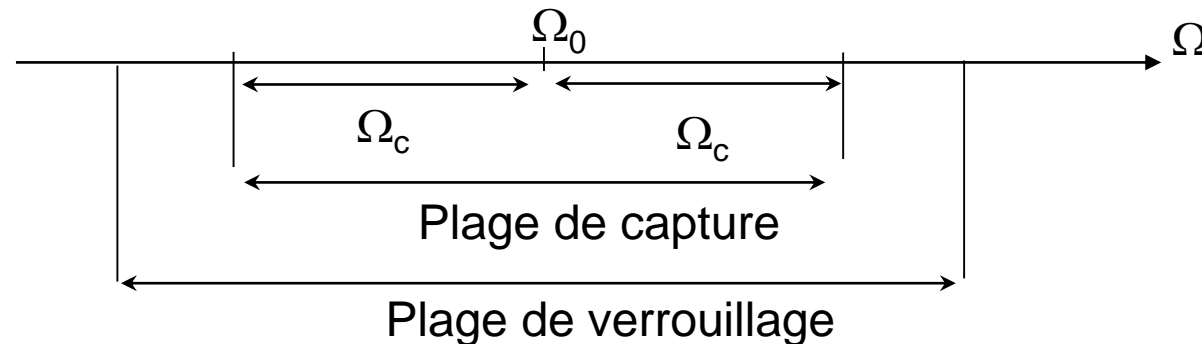
Plage de capture:

La plage de capture correspond à l'intervalle des pulsations pour lequel la PLL se verrouille. On étudie dans ce cas le passage de l'état décroché à l'état verrouillé.

Plage de verrouillage

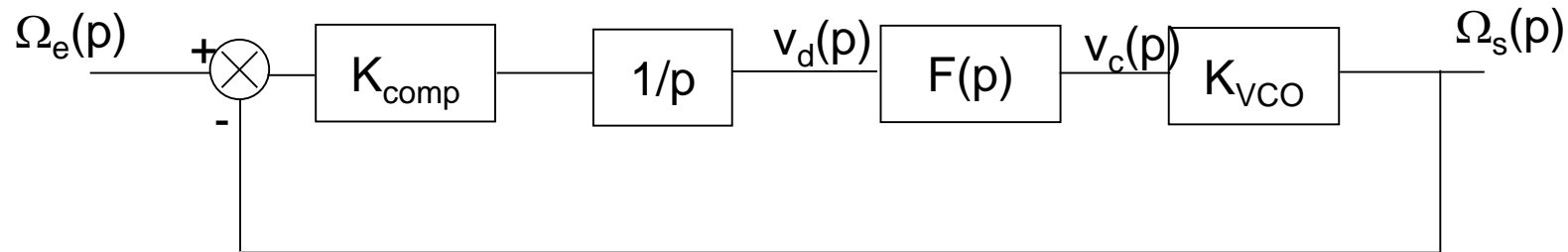
La plage de verrouillage correspond à l'intervalle pour lequel la PLL reste verrouillée. On étudie donc le passage de l'état verrouillé à l'état décroché.

Rq: La plage de verrouillage n'est pas nécessairement égale à la plage de capture



Les PLL

- Modélisation en régime linéaire



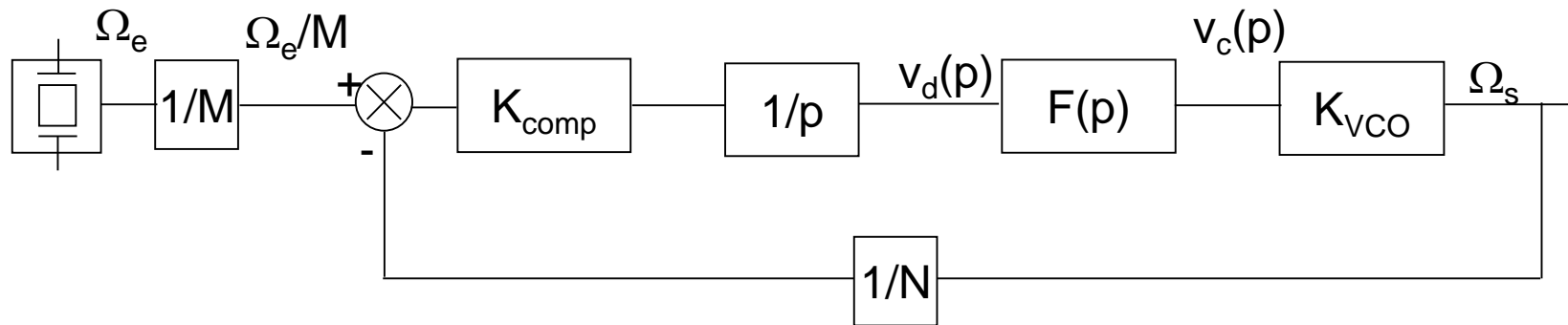
- Détermination de la fonction de transfert en boucle ouverte:

$$H_{BO}(p) = \frac{K_{comp}}{p} \cdot F(p) \cdot K_{VCO} = \frac{\omega_0}{p} \cdot F(p)$$

$\omega_0 = K_{comp} \cdot K_{VCO}$: pulsation propre de la PLL

Les PLL

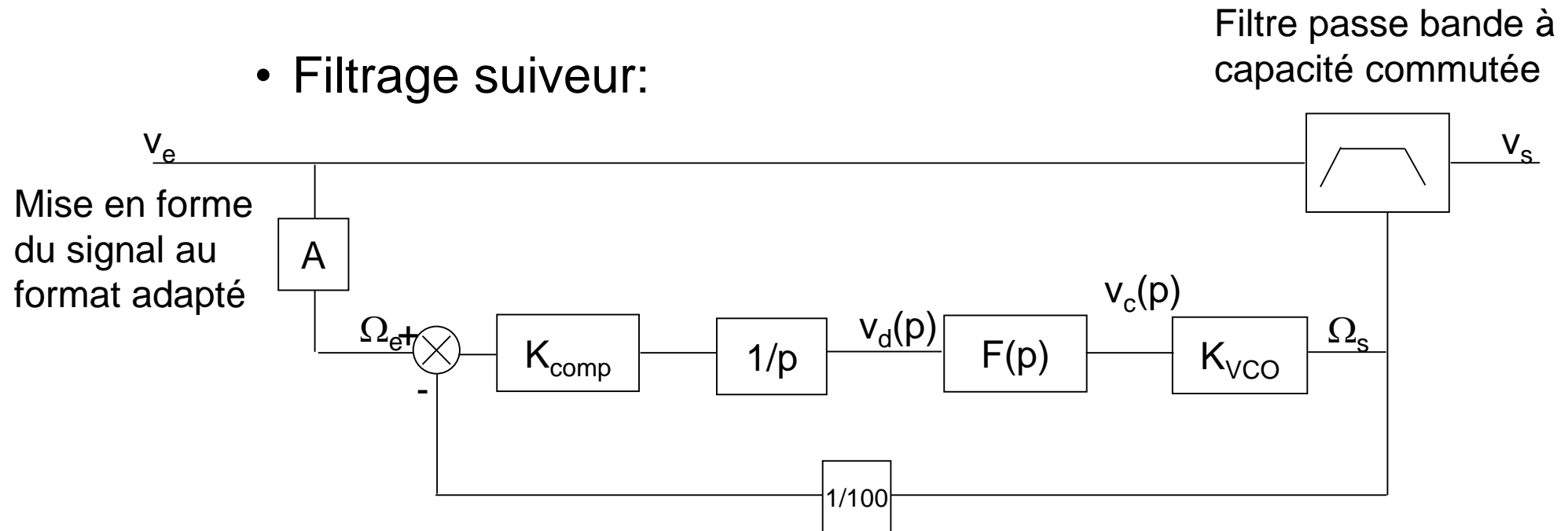
- Applications des PLL
- Synthèse de fréquence:



Les PLL

- Applications des PLL

- Filtrage suiveur:



La modulation de fréquence & PLL

- Les contraintes de l'APP
 - Modulation utilisant une PLL
 - Le composant PLL est imposé: **74HC4046AN**
 - Plage de verrouillage de la PLL au moins de 10kHz
 - Assurer une marge de phase de 45°

Le planning de la séance

Durée	Tâches à réaliser durant la séance
1h	COURS D'INTRODUCTION SUR LA PLL et SON PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT
1h15	<p>TRAVAIL PERSONNEL</p> <p>Objectif : Comprendre le fonctionnement d'une PLL et trouver des applications pour illustrer son utilisation.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Lecture des documentations techniques fournies par les tuteurs - Recherche sur internet - Recherche d'application de la PLL (notamment modulation FM) <p><u>NB</u> : Attention à ne pas lire tous les documents de manière exhaustive, vous n'en auriez pas le temps</p>
1h25 +25'	<p>TRAVAIL EN GROUPE</p> <p>Objectif : Bilan de l'étude bibliographique, mise en commun</p> <ul style="list-style-type: none"> - Faire le bilan des lectures et discuter autour des points à éclaircir - Proposer la structure d'un modulateur FM répondant au cahier des charges - Bilan de groupe de la première séance - 1^{er} livrable : Faire la liste des questions en suspens (1 slide) et la remettre aux tuteurs - 2nd livrable : Présentation courte aux tuteurs (1 slide, 5min) de la solution retenue