



# Électronique analogique E2I-3

## Chapitre 4 Filtrage analogique



### Plan

1. Pourquoi traiter le filtrage analogique
2. Domaines d'application des filtres
3. Bases du filtrage/outils de conception
4. Filtres passifs/filtres actifs
5. Réponse en fréquence d'un filtre
6. Types de filtres: passe-bas, passe-haut....
7. Gabarit: contraintes en amplitude
8. Synthèse d'un filtre = trouver un filtre dont la réponse s'inscrit dans la gabarit
9. Gabarit d'un passe-bas: grandeurs caractéristiques
10. Normalisation des fréquences: intérêt
11. Transposition des fréquences: intérêt
12. Caractéristiques des passe-bas et des passe-haut
13. Caractéristiques des filtres pass-bande
14. Passe-bas prototype
15. Les étapes de réalisation d'un filtre
16. Transposition passe-haut ↔ passe-bas
17. Tansposition passe-bande ↔ passe-bas





## 1. Pourquoi traiter le filtrage analogique ?

Le monde qui nous entoure est analogique

La mesure et la commande sont généralement analogiques:

- le signal issu d'un capteur est analogique
- le signal pilotant un actionneur est analogique

Les techniques de filtrage numérique reposent sur les bases du filtrage analogique

5



6



## 1. Pourquoi traiter le filtrage analogique ?

L'électronique numérique occupe une place très importante en électronique

mais...

Une partie analogique est toujours présente dans un système numérique dès lors qu'il y a un capteur et/ou un actionneur (**antirepliement, lissage**)

Une solution analogique parfois préférable à une solution numérique (coût, simplicité, **bruit, rapidité, domaine de fréquence**)

Les concepts du filtrage analogique sont réinvestis et exploités pour la synthèse de filtres numériques (transformation d'Euler, transformation bilinéaire)

7



8



## 1. Pourquoi traiter le filtrage analogique ?

### Bruit

- Les performances d'immunité vis-à-vis du bruit se dégradent progressivement pour les systèmes analogiques: ils restent utilisables sur de grandes plages
- Pour les filtres numériques, présence de seuils critiques au delà desquels le système ne fonctionne plus du tout

### Gamme de fréquence

- Les systèmes numériques nécessitent un échantillonnage à cadence limitée. Le coût d'un système numérique croît avec la fréquence max imale d'utilisation, qui est de toute façon limitée.
- Domaine hyperfréquence → filtres analogiques exclusivement

9



10

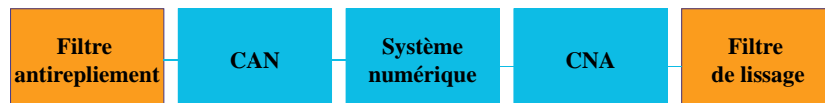


## 1. Pourquoi traiter le filtrage analogique ?

L'échantillonnage doit être réalisé en respectant le **critère de Shannon/Nyquist** (échantillonner à une cadence au moins supérieure au double de la fréquence max du signal pour conserver l'information)

Une chaîne de traitement numérique comporte des filtres analogiques

- en amont: un filtre antirepliement (antialiasing filter)
- en aval: un filtre de lissage



11



12



## 2. Domaines d'application: on trouve des filtres partout ...

- Téléphonie, télécommunications
- Hyperfréquences
- Réseau de distribution d'énergie
- Traitement de la parole
- Biomédical
- Sismique
- .....

13



14



## 3. Bases du filtrage/outils d'aide à la conception de filtres

- Maîtrise des principes du filtrage indispensable

Il existe des outils d'aide à la conception:

- Abaques, documents de référence: Techniques de l'Ingénieur, livres, documentations et notices constructeurs, logiciels fournis par constructeurs
- Logiciel de calcul (Matlab) et de simulation (toolboxes)
- Logiciel de simulation (PSPICE) et de routage (ORCAD)

15



16



## 4. Filtrés passifs/filtrés actifs

- **Filtrés passifs** → constantes localisées
- constantes réparties

Composés uniquement éléments passifs R, L, C, piezoélectriques, SAW (ondes de surface)

- **Filtrés actifs** → temps continu
- temps discret (capacités commutées)

Éléments passifs et actifs (amplificateurs, transistors)



## 4. Filtrés passifs/filtrés actifs

	Filtrés passifs	Filtrés actifs
<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Faciles à implémenter</li> <li>Faible bruit</li> <li>Ne nécessitent pas d'alimentation</li> <li>Utilisables à fréquences élevées</li> <li>Utilisation exclusive pour les hautes fréquences</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Amplification incluse</li> <li>Possibilité de grande sélectivité</li> <li>Mise en cascade possible</li> <li>Existent sous forme intégrée</li> <li>Possibilité de paramétrer facilement (capa. com.)</li> <li>Souplesse de réglage</li> </ul>
<b>Inconvénients</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conception difficile (méthodes élaborées)</li> <li>adaptation nécessaire entre étages (amont et aval)</li> <li>Problème des inductances à basse fréquence (taille, pertes)</li> <li>Mauvaises performances en basse fréquence</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Limitation en fréquence des éléments actifs (AOP, intégrateurs à capacité commutées)</li> <li>Alimentation nécessaire (embarqué ?)</li> </ul>





## 5. Réponse en fréquence d'un filtre

Lorsqu'un signal harmonique est appliqué à un filtre, l'action de celui-ci porte sur :

- l'amplitude
- la phase

suivant le domaine de fréquence

D'où l'intérêt d'étudier l'influence du filtre sur un signal harmonique:  
De plus, tout signal périodique peut (sous condition de convergence)  
se décomposer en une somme de signaux harmoniques.

21



22



## 6. Types de filtres

Classification suivant la gamme de fréquence sur laquelle le signal est inchangé:

- passe-bas (LP: low-pass filter) → les signaux basse fréquence sont transmis par le filtre
- passe bande (BP: band-pass filter)
- passe-haut (HP: high-pass filter)
- coupe bande (stop-band filter)
- réjecteur de fréquence (NOTCH: notch filter)

23

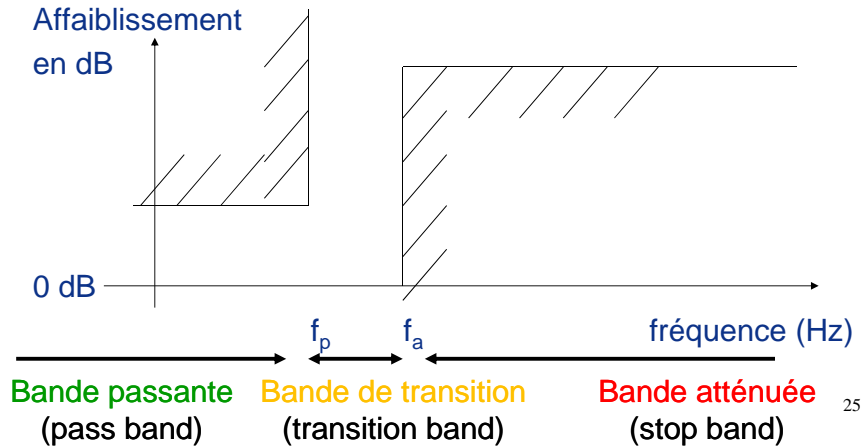


24



## 7. Gabarit = contraintes en amplitude

Exemple: gabarit d'un passe-bas

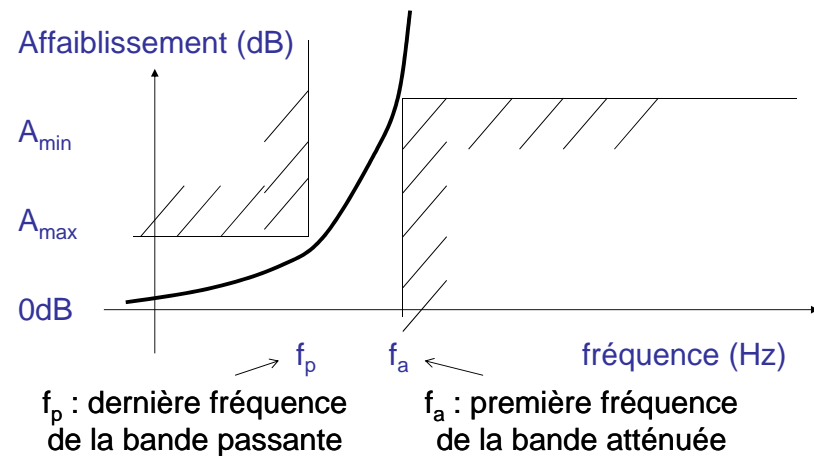


25

26



## 8. Synthèse du filtre = trouver un filtre dont la réponse s'inscrit dans le gabarit



27

28

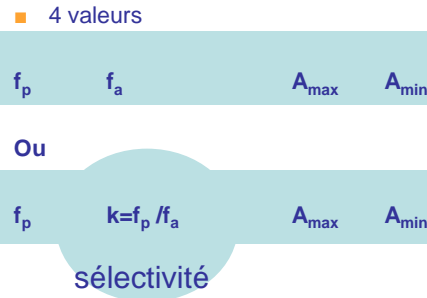




## 9. Gabarit d'un passe-bas: grandeurs caractéristiques

Gabarit = 2 points particuliers → quatre valeurs

- Point  $(f_p, A_{max})$
- Point  $(f_a, A_{min})$

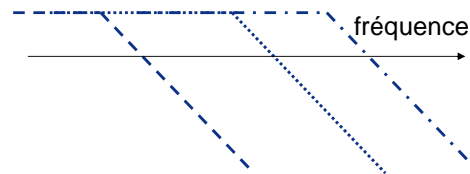


## 10. Normalisation des fréquences: intérêt

- Intérêt: deux filtres passe-bas de même sélectivité ont des fonction de transfert similaires

Exemple avec un passe-bas d'ordre 1:

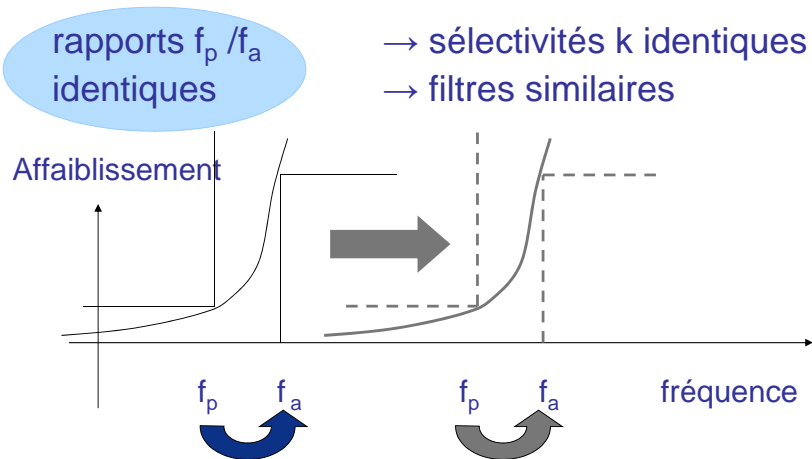
Tous les passe-bas du 1<sup>er</sup> ordre atténuent de 20 dB à une décade au delà de la fréquence de cassure: leur réponse en amplitude a la même allure







## 10. Normalisation des fréquences: intérêt



33



34



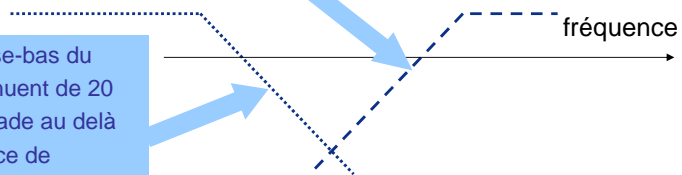
## 11. Transposition des fréquences: intérêt

- Intérêt: deux filtres passe-bas et passe-haut du 1<sup>er</sup> ordre ont des caractéristiques communes

Exemple avec un passe-bas d'ordre 1:

Tous les passe-haut du 1<sup>er</sup> ordre atténuent de 20 dB à une décade en dessous de la fréquence de cassure

Tous les passe-bas du 1<sup>er</sup> ordre atténuent de 20 dB à une décade au delà de la fréquence de cassure



35

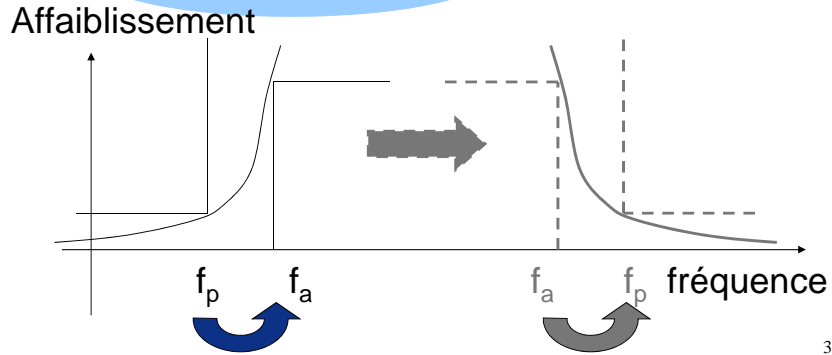


36



## 11. Transposition des fréquences: intérêt

sélectivités  $k$  identiques → filtres similaires



## 12. Caractéristiques des passe-bas et des passe-haut

- Passe-bas:  $A_{\max}$      $A_{\min}$      $k = f_p / f_a$
- Passe-haut:  $A_{\max}$      $A_{\min}$      $k = f_a / f_p$



$\Omega, u$  ou  $F = f / f_p$   
fréquences de normalisation

La sélectivité vaut  $k$

Remarque:  $0 < k < 1$

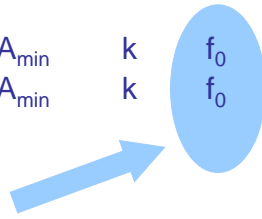




### 13. Caractéristiques des filtres passe-bande et coupe-bande

- Passe-bande
- Coupe-bande

$A_{\max}$	$A_{\min}$	$k$	$f_0$	$B$
$A_{\max}$	$A_{\min}$	$k$	$f_0$	$B$



$\Omega, u$  ou  $F = f / f_0$

fréquences de normalisation

Bande passante relative  $B = (fp^+ - fp^-)/f_0$  : c'est le 5<sup>ème</sup> paramètre pour le passe-bande

Sélectivité  $k = (fp^+ - fp^-)/(fa^+ - fa^-)$

Remarque:  $0 < k < 1$



### 13. Caractéristiques des filtres passe-bande et coupe-bande

Les méthodes de transposition s'appliquent aux filtres passe-bande (et coupe bande) à condition qu'ils soient **symétriques**.

Le gabarit doit être symétrique

$$fa^- fa^+ = fp^- fp^+ = f_0^2$$

$$fa^+ / fp^+ = fp^- / fa^-$$

Remarque: le gabarit est symétrique car les fréquences sont portées sur une échelle logarithmique





## 14. Passe-bas prototype

**Définition: gabarit du passe-bas prototype**  
c'est le gabarit du passe-bas en fréquence normalisée  
De même sélectivité que celle du filtre de départ  
(valeurs  $A_{\max}$  et  $A_{\min}$  également identiques)

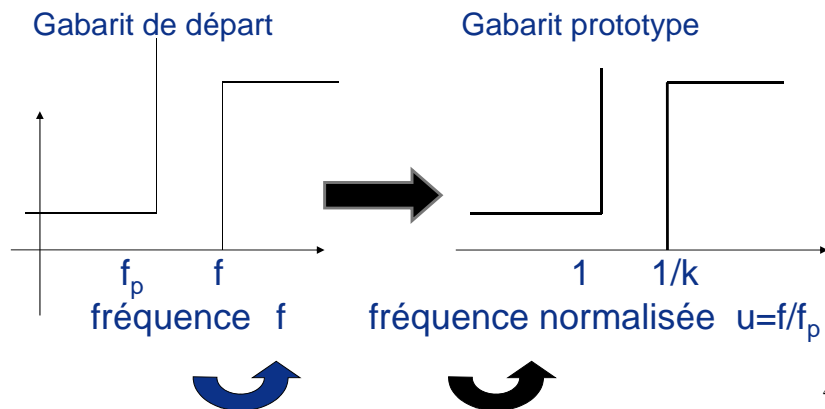
► ► ► ► Définition à connaître par cœur

A partir du gabarit de départ, la première étape consiste à établir le gabarit du passe-bas prototype: en réalité il d'agit d'une simple normalisation en fréquence



## 14. Passe-bas prototype

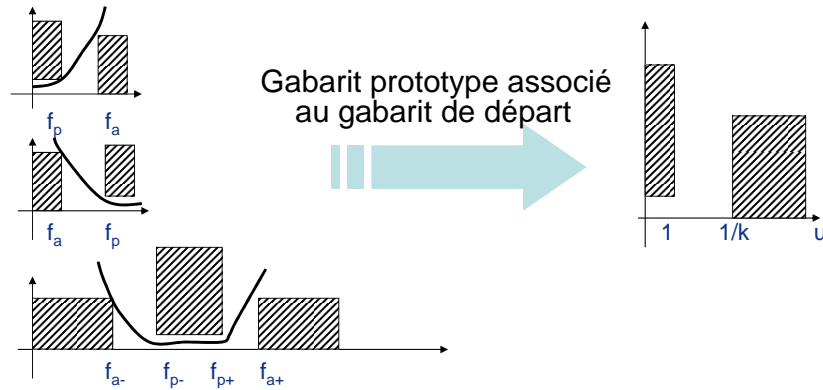
Passage du gabarit au gabarit prototype pour un passe-bas



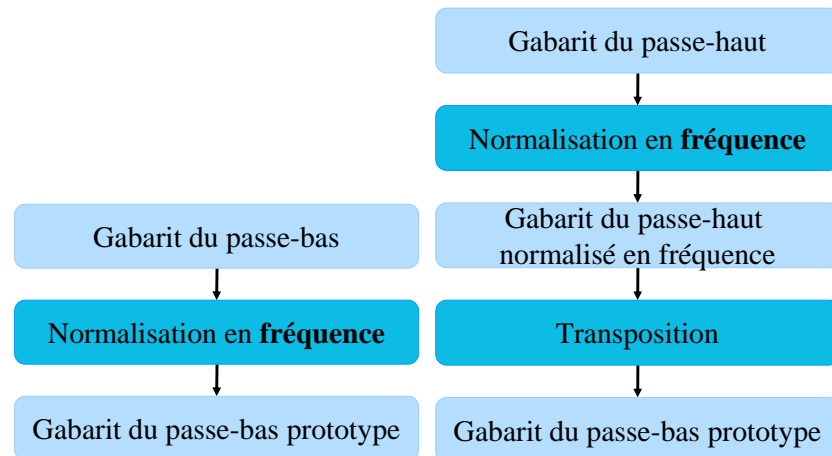


## 14. Passe-bas prototype

Généralisation à tout type de filtre (passe-bas, passe haut, passe-bande...)  
Passage au gabarit du passe-bas prototype



## 15 . Les étapes de réalisation d'un filtre





## 15 . Les étapes de réalisation d'un filtre

### Importance du passe-bas prototype

- Le choix de la fonction d'approximation se fait à partir du gabarit prototype (c'est plus simple de travailler systématiquement sur un passe-bas)
- Chaque fonction d'approximation a des propriétés (raideur de la pente dans la bande de transition, variations de l'affaiblissement en bande passante, présence ou non de zéros de transmission...) indépendamment du choix de la fréquence  $f_p$  (passe-bas et passe-haut) ou  $f_0$  (passe-bande, coupe bande). Exemples de fonctions d'approximation: Butterworth, Chebycheff, Bessel, Cauer ...
- Il est possible de travailler sur des fonctions de transfert normalisées (fonction d'une variable réduite) et des schémas normalisés ( en fréquence réduite et en impédance réduite)

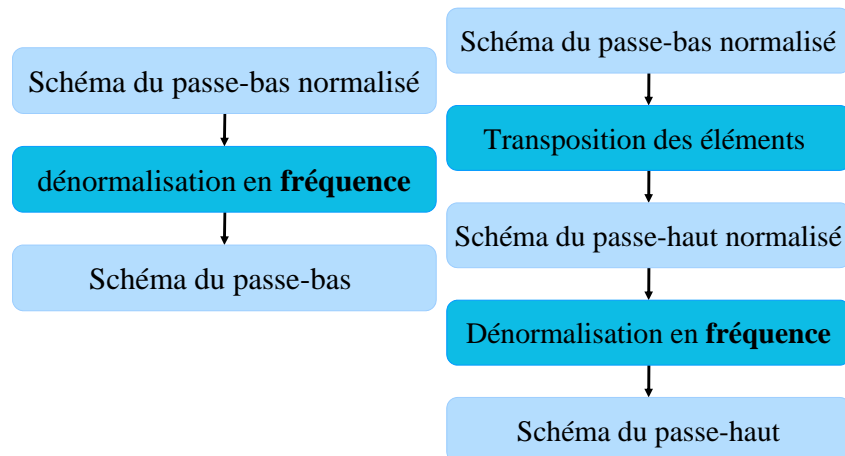
53



54



## 15 . Les étapes de réalisation d'un filtre



55



56



## 15 . Les étapes de réalisation d'un filtre

### Transposition du gabarit

- Normalisation  $u = f/f_p$
- Transposition du gabarit: par rapport à l'axe  $u = 1$

### Schéma et fonction de transfert

- $r, l, c, s$  = variables réduites
- $R_0, L_0, C_0, f_0$  ou  $f_p$  grandeurs de référence
- Transposition  $s \rightarrow 1/s$   
 $l/s \rightarrow l'/s = 1 / [(1/l')s]$ : une inductance de valeur normalisée  $l'$  donne une capacité de valeur  $1/l'$   
 $1/cs \rightarrow s/c = [1/c]s$ : une capacité de valeur normalisée  $c$  donne une inductance de valeur normalisée  $1/c$
- Dénormalisation  $R=rR_0 \quad C=cC_0 \quad L=lL_0$   
 $R_0 C_0 \omega_{norm} = 1 \quad R_0 / L_0 \omega_{norm} = 1$

57



58



## 15 . Les étapes de réalisation d'un filtre

### Gabarit

- Normalisation  $u = f / f_0$
- Transposition du gabarit par rapport à l'axe  $u=1$

### Schéma et fonction de transfert

- $r, l, c, s$  = variables réduites
- $R_0, L_0, C_0, f_0$  ou  $f_p$  grandeurs de référence
- Transposition  $s \rightarrow (s + 1/s)/B$  donne  $ls \rightarrow ?$   $1/cs \rightarrow ?$
- Dénormalisation  $R=rR_0 \quad C=cC_0 \quad L=lL_0$   
 $R_0 C_0 \omega_{norm} = 1 \quad R_0 / L_0 \omega_{norm} = 1$

59



60