



Christian GARING

Les Mille et Une Questions en PRÉPA

# PHYSIQUE

2<sup>e</sup> année PC/PC\*

4<sup>e</sup> ÉDITION  
ACTUALISÉE  
+  
Capacités  
numériques

ellipses

# Chapitre 1

## ■ Électronique ■

### Les ordres de grandeur utiles

#### Les composants

Résistances en électronique	1 k $\Omega$ à 1 M $\Omega$
Capacités en électronique	1 nF à 100 $\mu$ F

#### Le matériel de TP

Temps de montée du créneau d'un GBF	$dV/dt \approx 50 \text{ V}/\mu\text{s}$
Résistance de sortie d'un GBF	50 $\Omega$
Fréquence maximum d'un GBF	10 MHz
Bande passante d'un oscilloscope	60 MHz
Impédance d'entrée d'un oscilloscope	$R_e = 1 \text{ M}\Omega // C_e = 10 \text{ pF}$

#### L'amplificateur linéaire intégré (ALI)

Amplification en continu	$\mu_0 \approx 10^5 \text{ à } 10^6$
Bande passante	$f_0 \approx 10 \text{ Hz à } 1 \text{ kHz}$
Intensité maximale du courant de sortie	10 mA
Vitesse de balayage	$dV/dt \approx 10 \text{ V}/\mu\text{s}$

#### Le multiplieur AD 633

Coefficient multiplicatif	$k = 0,10 \text{ V}^{-1}$ .
Bande passante	500 kHz

### Le cours d'abord

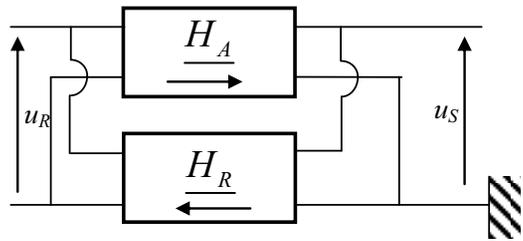
#### ■ Oscillateurs

1. Définir un oscillateur. Comment fabrique-t-on un oscillateur ?  
Comment avoir un oscillateur sinusoïdal ? Quelles sont ses caractéristiques ?
2. En électronique, la chaîne directe et la chaîne de retour sont souvent des quadripôles linéaires dont deux bornes sont reliées à la masse. Leur assemblage se fait suivant le schéma ci-dessous (où il n'y a plus d'entrée puisque  $e=0$ ). Quelle est alors la relation que doivent vérifier les deux fonctions de transfert  $\underline{H}_A$  et  $\underline{H}_R$  ?

Précisez cette condition si la chaîne directe est un amplificateur et la chaîne de retour est un filtre passe bande du deuxième ordre.

Écrire l'équation différentielle à laquelle obéit la tension  $u_R(t)$ .

Retrouver la condition théorique d'oscillation.



3. Expliquer pourquoi, en pratique, la condition théorique précédente doit être remplacée par une inégalité.
4. Comment l'amplitude des oscillations est-elle fixée ?

### ■ Électronique numérique

---

5. En quoi consiste l'opération d'échantillonnage d'un signal fonction continu du temps ? Définir la fréquence d'échantillonnage  $f_e$ .
6. Énoncer la condition de Nyquist-Shannon.
7. Quel est le principe d'un convertisseur analogique-numérique ? Quels sont ses principaux paramètres de fonctionnement ?
8. Quelles sont les caractéristiques du spectre du signal discret obtenu après échantillonnage du signal d'origine ? En particulier, quelles sont les similitudes et les différences entre le spectre du signal d'origine et le spectre du signal échantillonné ?
9. Expliquer le phénomène de repliement de spectre.
10. Quel traitement permet, sur le signal à échantillonner, de supprimer ce repliement ?

### ■ Modulation - Démodulation

---

11. Quel est l'intérêt de la modulation ?
12. Définir un signal modulé en amplitude, en fréquence, en phase.
13. Une porteuse de pulsation  $\omega$  doit être modulée en amplitude par une information à transmettre sinusoïdale de pulsation  $\Omega$ . Comment effectuer la modulation ? Quel est le spectre du signal modulé ?
14. Peut-on extraire l'information du signal modulé à l'aide d'un filtre ? Si, oui, de quelle nature doit-il être, sinon comment faut-il procéder ?

15. Un multiplieur est un circuit intégré capable de réaliser à l'instant  $t$  le produit de deux tensions d'entrée  $u_1$  et  $u_2$  pour donner en sortie une tension  $u_s = k u_1 u_2$ .

Quelle est l'unité de  $k$  ?

Les deux tensions d'entrée sont imposées à deux pulsations différentes :

$$u_1(t) = c_1 + a_1 \cos \omega_1 t \quad \text{et} \quad u_2(t) = c_2 + a_2 \cos \omega_2 t$$

Calculer la tension de sortie et montrer que l'opération de multiplication a enrichi le spectre des tensions initiales. Commenter le résultat.

### Conseils à suivre □ Erreurs à éviter

- La notation complexe en  $\exp(j\omega t)$  est très utile en électronique mais elle est n'est valable en toute rigueur qu'en régime sinusoïdal à la pulsation  $\omega$ . Sinon, quelle serait la signification du  $\omega$  dans l'exponentielle ? En régime variable quelconque (non sinusoïdal) il est souvent préférable de revenir aux relations linéaires du type  $u_L = L di_L / dt$  (tension aux bornes d'une bobine) ou  $i_C = dq / dt = C du_C / dt$  (courant dans un condensateur) et établir une équation différentielle dont la solution est la fonction cherchée (tension ou courant). L'équation différentielle obtenue est bien entendu valable dans le cas du régime sinusoïdal ; étant unique, elle peut être établie dans ce cas particulier avec la notation complexe puis étendue au cas d'une fonction du temps quelconque vue comme une superposition de sinusoïdes au sens de Fourier, mais cette justification doit être présentée et elle est souvent aussi longue que le calcul direct !
- La représentation complexe ne doit pas être utilisée pour exprimer une puissance en régime sinusoïdal. La puissance consommée par un dipôle  $P = UI \cos \varphi$  (avec  $U$  la tension efficace aux bornes du dipôle,  $I$  le courant efficace traversant le dipôle et  $\varphi$  le déphasage tension-courant) est en effet non linéaire. On retrouve la même difficulté en électromagnétisme : *ne pas utiliser la notation complexe pour les énergies et les puissances.*
- La non linéarité des multiplieurs interdit l'utilisation de la notation complexe : il faut travailler en réel (avec des sinus et des cosinus) et connaître parfaitement les formules trigonométriques permettant de transformer un produit en somme.
- La valeur quadratique moyenne d'un signal n'est égale à sa valeur maximale divisée par  $\sqrt{2}$  que dans le cas où il est sinusoïdal. Sinon, il faut reprendre le calcul à partir de la définition. Pour cette raison, il est préférable d'employer dans le cas non sinusoïdal comme vocabulaire « RMS » plutôt que « efficace ».
- Un raisonnement de type spectral doit devenir un réflexe : se demander d'abord si le filtre est linéaire. Si c'est le cas, il n'ajoute aucune nouvelle composante spectrale et se contente de modifier en amplitude et en phase les composantes existantes, sinon, il enrichit le spectre.

Pour préciser l'effet d'un filtre linéaire sur un signal périodique, il faut penser à son effet sur chaque fréquence du spectre du signal, et donc, se demander :

- le filtre laisse-il passer ou non le continu ? (si c'est non, le signal de sortie est à moyenne nulle),
- le filtre est-il extrêmement sélectif ? (si oui, la sortie est soit sinusoïdale à la fréquence sélectionnée par le filtre si elle existe dans le spectre d'entrée, soit nulle sinon),
- le filtre coupe-t-il les hautes fréquences du spectre ? (si oui, les variations temporelles du signal de sortie sont moins « abruptes » que celles de l'entrée).

- Un filtre linéaire affecte aussi la phase de chaque composante spectrale, même si on a tendance à privilégier l'action sur l'amplitude dans les représentations graphiques. Par exemple, l'inversion d'une composante spectrale (donc sinusoïdale) se traduit par une avance de phase de  $\pi$  de la sortie par rapport à l'entrée et une intégration (sans inversion) se traduit par un retard de  $\pi/2$ .
- Aucun filtre passe-bas, même numérique, n'est capable de réaliser une coupure franche à une fréquence choisie (c'est-à-dire ne pas atténuer du tout les composantes spectrales de fréquence inférieure et faire disparaître toutes les fréquences supérieures). Se souvenir qu'un passe-bas analogique du premier ordre coupe avec une pente asymptotique à  $-20$  dB/décade, du deuxième ordre à  $-40$  dB/décade, etc...
- Sauf précision contraire, tous les ALI utilisés sont supposés parfaits. Mais cela ne signifie pas nécessairement que la différence de potentiel entre l'entrée inverseuse et l'entrée non inverseuse soit nulle, il faut en plus pour cela que le régime soit linéaire.
- Le courant de sortie d'un ALI étant généralement non nul (et inconnu) il n'est pas utile d'appliquer la loi des nœuds à la sortie d'un ALI.

## Applications directes du cours

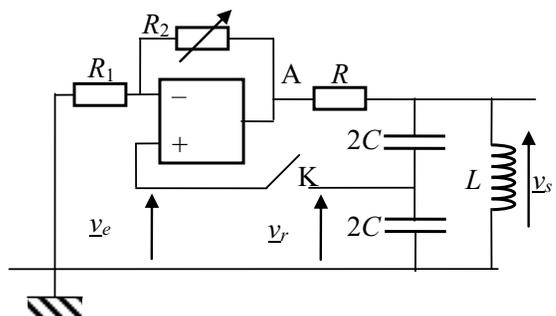
### ■ Oscillateurs

#### 16. Oscillateur de Colpitts

Dans ce montage l'ALI est idéal et fonctionne en régime linéaire.

- a) L'interrupteur K étant ouvert, calculer les fonctions de transfert :

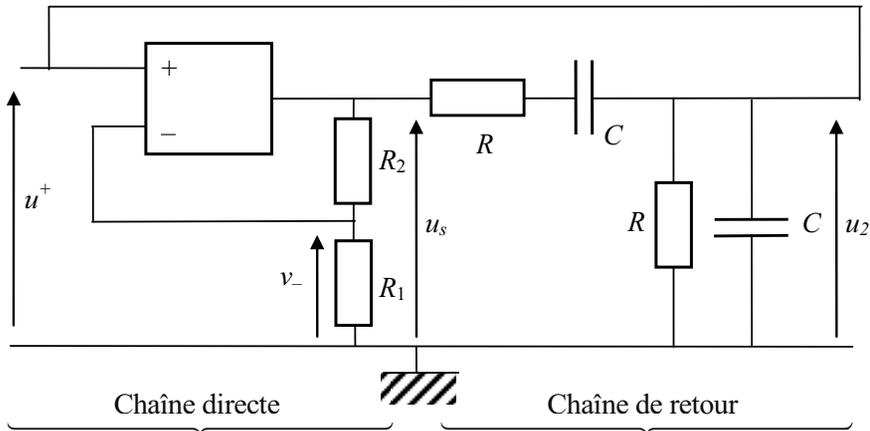
$$\underline{H}_A = \frac{v_s}{v_e} \quad \text{et} \quad \underline{H}_R = \frac{v_r}{v_e}$$



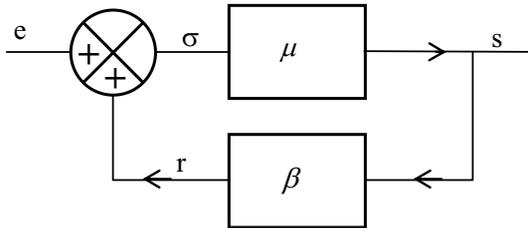
- b) On ferme l'interrupteur, pour quelle valeur minimale de  $R_2$  des oscillations prennent-elles naissance ? Quelle est leur pulsation ?

### 17. Oscillateur à pont de Wien

L'ALI est idéal et fonctionne en régime linéaire. Ce montage délivre une tension de sortie  $u_s$  en l'absence de toute tension d'entrée. On pose :  $\omega_0 = 1/RC$



- a) Montrer que le montage linéaire peut être assimilé à ce schéma bloc formel, et préciser quelles sont les grandeurs de retour ( $r$ ), de sortie ( $s$ ), et somme ( $\sigma$ ).



- b) On se place en régime sinusoïdal. Trouver sur le schéma bloc la formule (appelée formule de Black) donnant  $\underline{s}$  en fonction de  $\underline{e}$ .

Que vaut la grandeur d'entrée  $\underline{e}$  pour cet oscillateur ? En déduire la condition d'oscillation sinusoïdale du système bouclé.

- c) Déterminer, en régime sinusoïdal à la pulsation  $\omega$ , les fonctions de transfert complexes de la chaîne directe  $\underline{\mu} = \frac{u_s}{u_+}$  et de la chaîne de retour  $\underline{\beta} = \frac{u_2}{u_s}$ .

En déduire la fréquence de fonctionnement de l'oscillateur sinusoïdal, et la valeur que doit prendre  $R_2$  en fonction de  $R_1$  pour que cette oscillation soit possible.

- d) Trouver l'équation différentielle à laquelle obéit la tension de sortie  $u_s$  en régime quelconque lorsque le fonctionnement de la chaîne directe reste linéaire. Retrouver les résultats de la question précédente.

Expliquer comment il faut s'y prendre pour que l'oscillateur démarre spontanément, et décrire l'évolution de  $u_s$  lors du démarrage de cette oscillation.

## ■ Échantillonnage

18. Une corde en mouvement ondulatoire, excitée par un vibreur sinusoïdal de fréquence  $f = 50$  Hz, ne peut pas être observée correctement à l'œil qui n'est pas assez rapide pour discerner ses différentes positions. Pour ralentir artificiellement le mouvement de la corde, on l'éclaire avec une lampe stroboscopique qui délivre des flashes lumineux très brefs à la fréquence  $f_e$  réglable par un potentiomètre gradué. Quelle fréquence faut-il choisir pour voir une période apparente  $T_a = 1/f_a$  d'une demi-seconde ?
- Serait-il possible d'observer un mouvement apparent en sens inverse du mouvement réel, par exemple une onde progressive qui recule au lieu d'avancer ? Faire le lien entre ce problème et le repliement du spectre étudié en travaux pratiques.

## Questions de réflexion □ Physique pratique

19. Quel est l'ordre de grandeur de la puissance délivrée par un ALI ? Est-ce suffisant en pratique pour les utiliser en sortie d'appareils comme des alimentations continues ou des amplis audio ?
20. Quels sont les principes de la compression MP3 utilisée pour que les fichiers informatiques de musique soient jusqu'à dix fois moins volumineux que les fichiers audio natifs (au format WAV par exemple) sans perte notable de qualité ? (penser à utiliser un raisonnement spectral plutôt que temporel).
21. À quelle fréquence est échantillonné un disque compact ? Pour quelles raisons ce choix a-t-il été fait ?
22. Pour échantillonner un signal dans de bonnes conditions, il faut des périodes (et donc des fréquences) extrêmement stables, c'est-à-dire dérivant très peu au cours du temps. En électronique numérique, il faut souvent des filtres de très grand facteur de qualité. Voyez-vous un lien entre ces deux contraintes ?
- Quel est, en électronique le composant à bas coût, universellement utilisé pour répondre à ce cahier des charges et sur quel phénomène physique est basé son fonctionnement ?
23. Un synthétiseur est un appareil produisant des sons à l'aide de circuits électroniques. Quels types de circuit faut-il choisir pour régler la hauteur, le timbre et l'intensité du son ?
24. Pour transmettre plusieurs communications téléphoniques à travers un seul fil (ou plusieurs signaux dans la même fibre optique), on peut utiliser le multiplexage fréquentiel. Comment cela fonctionne-t-il ?
25. Les récepteurs radio sont dits superhétérodynes ; de quoi s'agit-il ?

## Exercices

### 26. CD et repliement du spectre

Le but est de graver sur un CD une chanson issue d'un microphone dans un studio amateur d'enregistrement. Problème : sur ce signal musical, se superpose un bruit électronique parasite sinusoïdal à la fréquence  $f = 42,1$  kHz, et personne ne le remarque dans le studio, car le son est inaudible pour les fréquences au-delà de 20 kHz.

Les spécifications de l'industrie du CD imposent une opération d'échantillonnage du signal à la fréquence de  $f_e = 44,1$  kHz (voir la question 21.).

a) Sachant que l'échantillonnage se fait avec une résolution de 16 bits avec deux voies gauche et droite séparées en stéréo, calculer la taille minimale en mégaoctets (un octet correspond à 8 bits) du fichier musical, de durée  $\Delta t = 74$  minutes à graver sur le CD.

En réalité, les fichiers sont un peu plus lourds, pourquoi ?

b) La condition de Nyquist-Shannon est-elle vérifiée sans le bruit parasite ? Avec le bruit parasite ?

c) Montrer que dans le spectre du signal échantillonné au studio apparaît une fréquence audible. Est-elle gênante à l'oreille ? Est-ce toujours le cas ?

d) Pour s'affranchir de ce problème, il faut soumettre le signal à échantillonner, juste avant cette opération, à un filtrage. Quel type de filtrage doit-on employer (passe-haut, passe-bande,...) ? Comment a-t-on intérêt à choisir la fréquence de coupure ? Comment s'appelle le filtre ?

e) À partir de quelle valeur de la fréquence le filtre doit-il entièrement bloquer le spectre ? Jusqu'à quelle fréquence doit-il le laisser passer sans aucune atténuation ? Est-ce facilement compatible ? Pourquoi les défauts qui apparaissent inmanquablement sont-ils néanmoins supportables ?

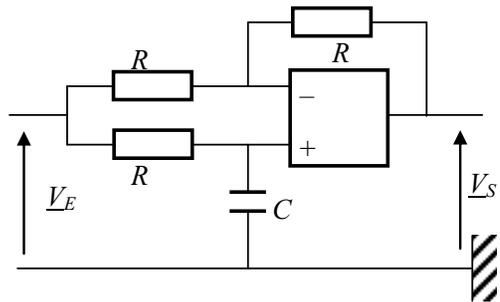
f) Quelle amélioration pourrait-on proposer pour s'affranchir des difficultés mises en évidence dans cet exercice ?

### 27. Oscillateur sinusoïdal à déphaseur

a) Déterminer la fonction de transfert

$\frac{V_S}{V_E}$  du circuit ci-contre. Justifier le

nom de « passe tout déphaseur » qui lui est parfois donné.



Soit le montage page suivante avec :

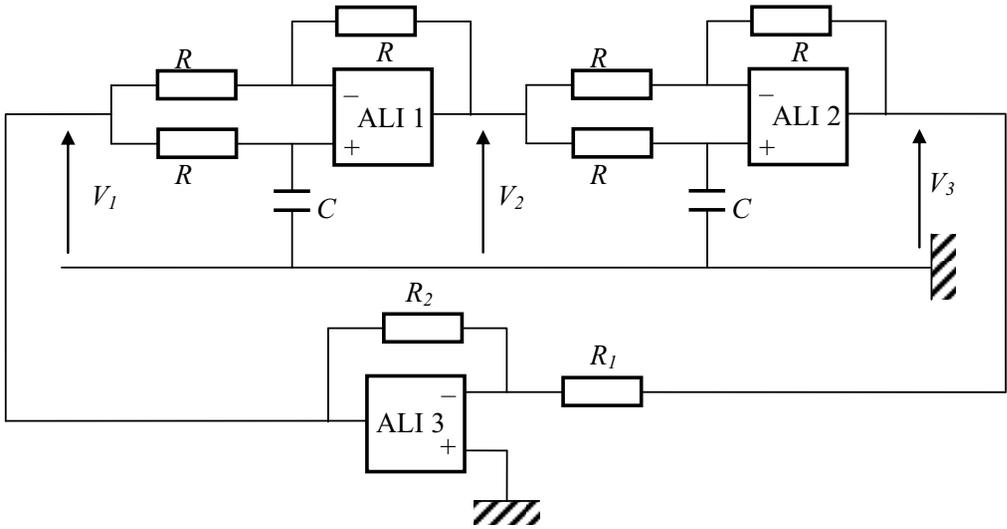
$$A = -\frac{R_2}{R_1}, \quad \tau = RC \quad \text{et} \quad \underline{H} = \frac{1 - j\tau\omega}{1 + j\tau\omega}.$$

b) Tous les ALI sont supposés parfaits et fonctionnent en régime linéaire.

Quelle doit être la valeur  $A_0$  de  $A$  pour que le montage ci-dessus soit un oscillateur sinusoïdal ? Quelle est la pulsation d'oscillation ?

c) Expliquer pourquoi le choix  $A = A_0$  n'est pas pertinent.

d) Établir une équation différentielle en  $V_3(t)$  seulement.



e) Vérifier que l'on retrouve le b) pour  $A = A_0$ .

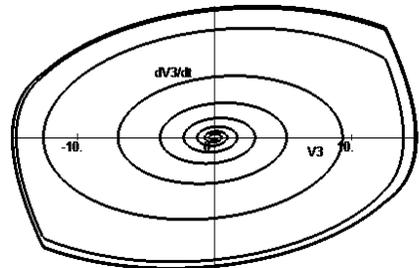
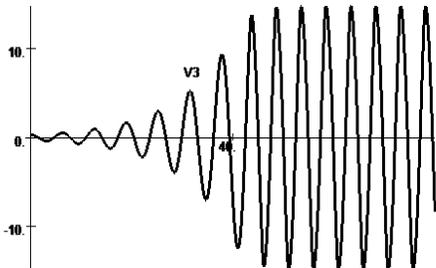
Pour obtenir un oscillateur, faut-il choisir  $A > A_0$  ou  $A < A_0$  ?

f) Donner la forme de la solution dans le cas  $A = A_0 - \varepsilon$  avec  $0 < \varepsilon \ll 1$ .

g) Montrer qu'il y a nécessairement apparition de la saturation des ALI. On suppose par exemple que l'ALI 3 est saturé. Va-t-il le rester ?

h) Commenter la courbe donnant  $V_3(t)$  en fonction du temps réduit  $t/\tau$ , ainsi que

le diagramme de phase  $\frac{dV_3}{dt}$  en fonction de :



*Remarque : ces courbes ont été tracées pour  $A = -1,2$ , en supposant que seul l'ALI3 sature et que les deux autres fonctionnent toujours en régime linéaire.*

## 28. La détection synchrone

### 1. Principe de la détection synchrone

Un signal variant lentement au cours du temps, le plus souvent une tension à mesurer, est noté  $s(t)$ . Pour diverses raisons, le détecteur lui superpose du bruit inconnu, aléatoire, et à large spectre, noté  $b(t)$  et mesure en fait :  $s(t) + b(t)$ .

Il n'est pas rare que le signal soit totalement noyé dans le bruit, et donc impossible à mesurer directement.