PSI/PSI*

PHYSIQUE CHIMIE

1 DEVOIR CORRIGÉ PAR SEMAINE



avec copies, annales & corrigés commentés

Bastien Daures

ellipses

PSI/PSI*

Physique–Chimie

1 DEVOIR CORRIGÉ PAR SEMAINE



Bastien DAURES
Professeur agrégé de sciences physiques
Enseignant à l'École Nationale Supérieure Maritime
de Marseille

ellipses

Conception graphique couverture : Nathalie FOULLOY

ISBN 9782340-116528

Dépôt légal : août 2026

©Ellipses Édition Marketing S.A.
8/10 rue la Quintinie 75015 Paris



Le Code de la propriété intellectuelle et artistique n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1er de l'article L. 122-4).
Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

www.editions-ellipses.fr

À ma femme,
à qui ce livre doit bien plus qu'à moi.

Remerciements

Je tiens à remercier mon collègue Mohamed Robert, enseignant agrégé de physique appliquée à l'Ecole Nationale Supérieure Maritime de Marseille, pour sa collaboration dans les sujets d'électrotechnique.

Un remerciement également aux élèves de la PSI de l'Institution Sainte-Marie d'Antony (92) d'avoir testé une partie des sujets de ce livre.

Enfin, un très grand merci à tous ceux qui, directement ou indirectement, font vivre et prospérer les classes préparatoires aux grandes écoles, modèle unique au monde, aventure humaine et intellectuelle hors-norme.

Sommaire

Quelques points de méthodologie 7

Index thématique 11

Devoirs

- Devoir 1 16
- Devoir 2 20
- Devoir 3 24
- Devoir 4 27
- Devoir 5 31
- Devoir 6 34
- Devoir 7 38
- Devoir 8 42
- Devoir 9 45
- Devoir 10 49
- Devoir 11 51
- Devoir 12 53
- Devoir 13 56
- Devoir 14 59
- Devoir 15 63
- Devoir 16 66
- Devoir 17 70
- Devoir 18 74
- Devoir 19 80
- Devoir 20 84
- Devoir 21 87
- Devoir 22 90
- Devoir 23 94
- Devoir 24 97
- Devoir 25 101
- Concours Centrale 104

Corrigé

- Corrigé du devoir 1 112
- Corrigé du devoir 2 122
- Corrigé du devoir 3 130
- Corrigé du devoir 4 139
- Corrigé du devoir 5 146
- Corrigé du devoir 6 156
- Corrigé du devoir 7 164
- Corrigé du devoir 8 174
- Corrigé du devoir 9 181
- Corrigé du devoir 10 190
- Corrigé du devoir 11 200
- Corrigé du devoir 12 208
- Corrigé du devoir 13 217
- Corrigé du devoir 14 225
- Corrigé du devoir 15 234
- Corrigé du devoir 16 241
- Corrigé du devoir 17 252
- Corrigé du devoir 18 259
- Corrigé du devoir 19 268
- Corrigé du devoir 20 275
- Corrigé du devoir 21 285
- Corrigé du devoir 22 294
- Corrigé du devoir 23 303
- Corrigé du devoir 24 311
- Corrigé du devoir 25 319
- Concours Centrale 327

Quelques points de méthodologie

"Je passe directement au TD car je n'ai pas le temps d'apprendre le cours. De toute façon, aux concours ce sont des exos et pas des questions de cours."

On entend régulièrement cette phrase dans les couloirs d'une classe préparatoire.

Vous ne pourrez pas évoluer de manière sereine ni efficace si vous vous limitez à quelques exercices de TD sans approfondir ni apprendre le cours.

Le cours est le premier élément de vos nouvelles connaissances, qu'il ne suffit plus de juste *comprendre*. Il renferme une énorme quantité de démonstrations, de méthodes, de raisonnements classiques qui apparaissent clairement au programme officiel. Il ne sert à rien de vouloir aller plus loin sur des exercices du TD si ces éléments du cours ne sont pas sus et maîtrisés.

Certains TD contiennent des exercices d'application directe du cours. Ils ne peuvent pas se substituer à un apprentissage préalable du cours. Ils sont là pour que vous puissiez vérifier votre maîtrise de ce dernier.

Les concours, quels qu'il soient, comportent des questions explicites de cours, faisant référence à des démonstrations ou raisonnements qui apparaissent clairement dans le cours. Les points à récupérer sur ces questions sont censés être *donnés*. Seulement, on observe souvent que ce n'est pas systématiquement le cas. Si vous maîtriser le cours, vous assurez des points "faciles" aux concours.

Voilà un tableau donnant une répartition approximative des questions de cours selon le concours passé :

Concours	**Cours direct**	**Réflexion & application**
X–ENS	$\sim 5\,\%$	$\sim 95\,\%$
Mines–Ponts	$\sim 10\,\%$	$\sim 90\,\%$
Centrale–Supélec	$\sim 15-20\,\%$	$\sim 80-85\,\%$
CCP / CCINP	$\sim$ 40-50 %	$\sim 50-60\,\%$
E3A–Polytech	$\sim 90\,\%$	$\sim 10\,\%$

"Je n'ai pas le temps de préparer le TD de demain car je dois réviser ma khôlle de cet après-midi."

Cette phrase également est souvent entendue. Mais voilà une contre-vérité : une khôlle ne se révise pas.

Précisons un peu. Il n'est pas possible de se réserver, chaque semaine, des créneaux de une ou deux heures, spécifiquement consacrés à la "révision de la khôlle".

La khôlle se révise en continu. Apprendre le cours, c'est réviser la khôlle. Préparer le TD, c'est réviser la khôlle. Reprendre les exercices corrigés du TD, c'est réviser la khôlle.
Vous ne pouvez pas vous contenter d'apprendre le cours et de réviser les exerices du TD un ou deux jours avant la khôlle, histoire que les notions soient "fraîches" dans votre esprit.

La révision de la khôlle, tout comme les DS et les concours, se fait tous les jours. Relecture et apprentissage du cours le soir même du jour du cours. Préparation du TD correspondant avant la séance correspondante. Relecture et révision du TD le soir même du TD et les jours suivants.
La khôlle n'est ainsi qu'une *étape* de plus dans votre travail hebdomadaire : une vérification des acquis quotidienne.

Une mauvaise note en khôlle parce que vous avez pris du retard dans votre travail vaut mieux qu'un nouveau TD non préparé, qui accentuera encore plus votre retard.

"Je comprends la correction des TD mais je n'arrive plus dés que c'est en DS ou sur un sujet de concours."

La réponse est :

Comment révisez-vous votre TD ?

Il ne sert à rien de relire la correction d'un exercice difficile puis de passer à celui encore plus difficile : il faut le REFAIRE.

Quand on dit REFAIRE, cela signifie le REFAIRE VRAIMENT. Vous prenez une nouvelle feuille (de brouillon ou autre), le sujet de TD (sans la correction) et vous reprenez le temps de refaire l'exercice vous même, à votre rythme, avec votre manière de rédiger. C'est l'unique manière de réellement se préparer au situations réelles de DS ou concours.

"Ma prépa n'est pas assez bonne pour que j'intègre une école du TOP 15. Elles sont réservées aux autres."

Le classement de votre établissement ne préfigure rien, absolument rien sur vos résultats aux concours.

C'est votre travail, votre investissement, votre curiosité et votre envie qui vous donnera ou non la réussite escomptée aux concours. N'oubliez pas que *les autres, c'est vous.*

Profitez des vacances pour vous mettre à jour, mais également préparer les concours : ficher vos cours avant de ne plus avoir le temps, commencer à réviser les notions de première année, etc. Il est important de se souvenir que *Tout ce qui est fait n'est plus à faire.*

Index thématique

Électronique

Sous-thèmes	Devoir
Stabilité des systèmes linéaires	
(fonctions de transfert, critères de stabilité, diagrammes de Bode)	1
Amplificateur linéaire intégré (ALI) en régime linéaire	
(bouclage, contre-réaction, impédances d'entrée et de sortie)	1
ALI en régime saturé	
(comparateur, hystérésis, saturation)	2
Oscillateur de relaxation	
(seuils de basculement, période d'oscillation, non-linéarités)	2
Oscillateur quasi-sinusoïdal	
(condition de Barkhausen, stabilisation de l'amplitude)	3
Électronique numérique	
(échantillonnage, python, filtrage numérique)	3
Transmission de l'information	
(modulation et démodulation, traitement du signal)	4

Phénomènes de transport

Sous-thèmes	Devoir
Conduction électrique	
(loi d'Ohm locale, conductivité)	5
Diffusion thermique	
(loi de Fourier, équation de diffusion, flux thermique, bilan d'énergie)	6

Diffusion de particules	
(loi de Fick, équation de diffusion, sédimentation)	8
Fluides en écoulement	
(flux, débit, nombre de Reynolds, régimes laminaire et turbulent, pertes de charge)	7 & 9
Bilans macroscopiques	
(systèmes ouverts, bilan d'énergie, bilan de quantité de mouvement, puissance)	9

Electromagnétisme

Sous-thèmes	**Devoir**
Électrostatique	
(champ et potentiel électriques, théorèmes de Gauss et de superposition)	10
Magnétostatique et ARQS	
(champ magnétique, induction, loi de Faraday)	11
Milieux ferromagnétiques	
(aimantation, hystérésis, énergie magnétique, circuits magnétiques)	12

Conversion de puissance

Sous-thèmes	**Devoir**
Puissance en régime périodique sinusoïdal	
(puissance active, facteur de puissance, relèvement du facteur de puissance)	13
Transformateur monophasé	
(modèle équivalent, pertes, rendement, repère de Fresnel)	14

Conversion électro-magnéto-mécanique	
(machines synchrones et à courant continu, couple, bilan de puissance)	15 & 16
Conversion électronique statique	
(redresseurs, hacheurs, composants de puissance)	17

Physique des ondes

Sous-thèmes	**Devoir**
Équation d'onde de d'Alembert	
(ondes progressives, célérité, conditions aux limites, transmission de puissance)	18
Ondes sonores dans les fluides	
(pression acoustique, impédance, propagation, atténuation, transmission de puissance)	19
Ondes électromagnétiques dans le vide	
(propagation dans l'air, conducteurs, transmission de puissance)	20
Ondes électromagnétiques dans les plasmas	
(propagation dans le plamsa, absorption, réflexion et transmission)	21

Thermochimie

Sous-thèmes	**Devoir**
Premier principe physico-chimique	
(enthalpie standard, loi de Hess, approximation d'Ellingham)	22
Second principe physico-chimique	
(enthalpie libre, sens des réactions)	23

Procédés industriels continus *(systèmes ouverts, flux de matière, RPAC, réacteur piston)*	8 & 23

Électrochimie

Sous-thèmes	**Devoir**
Cinétique électrochimique *(réactions d'oxydo-réduction, surtensions)*	24
Corrosion électrochimique *(piles de corrosion, protection)*	24
Stockage et conversion de l'énergie chimique *(piles, accumulateurs)*	25

DEVOIRS

Devoir 1

Étude d'une chaîne d'instrumentation (2h)

⇒ *Thèmes abordés*
- Stabilité des systèmes linéaires
- L'amplificateur linéaire intégré en régime linéaire

Partie 1 : Étude préliminaire d'un condensateur (/7)

On utilisera dans la suite de ce problème des condensateurs. On cherche à vérifier si l'hypothèse de les considérer comme idéaux est bien justifiée.
Dans le domaine de fréquence utilisé, le condensateur réel peut être modélisé avec une résistance de fuite R_f en parallèle avec un condensateur parfait de capacité C.
Pour voir si la résistance R_f peut être négligée ou non, on décide d'introduire le condensateur dans un circuit RLC série puis d'étudier la réponse indicielle de ce circuit.
La bobine L a une inductance de 0,1 H et est également non-idéale, modélisée avec une résistance interne r_L en série. La résistance r_L a été déterminée par une manipulation préalable et vaut $12,5 \pm 0,5\Omega$. La capacité vaut $C = 0,1 \pm 0,01\mu F$. La résistance R vaut 200Ω et le circuit est alimenté par une source de tension continue E = 5 V à partir de $t = 0s$.

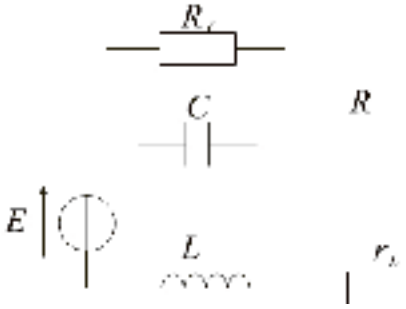


FIGURE 1 – Circuit RLC

1. Expliquer pourquoi les condensateurs et bobines réels sont modélisés comme tel. La résistance r_L est-elle négligeable ? (/0,5)

2.1. Établir l'équation différentielle de la tension $u_c(t)$ aux bornes du condensateur. (/1,5)

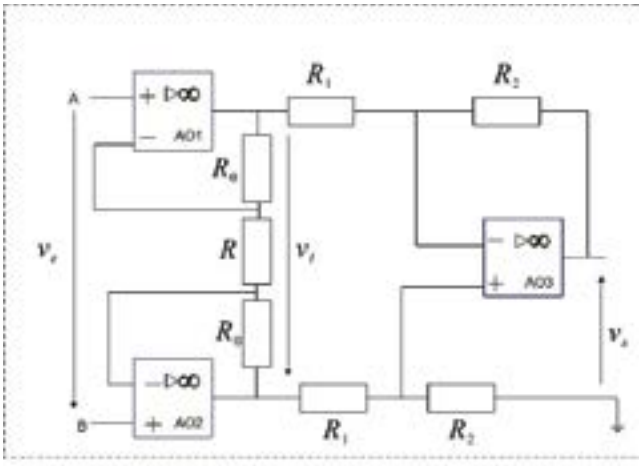
2.2. Établir, par une autre méthode, la fonction de transfert opérationnelle $H(p) = \dfrac{U_C(p)}{E(p)}$. (/1,5)
2.3. En transposant la fonction de transfert $H(p)$ dans le domaine temporel, vérifier la cohérence entre les questions 2.1 et 2.2. (/1)
2.4. En déduire si le système est stable ou non. (/0,5)

L'étude de la réponse à l'échelon donne $\omega_0 \approx 10^4 rad.s^{-1}$.

3.1. Établir l'expression de R_f et en donner un ordre de grandeur. (/1)
3.2. Pourra-t-on considérer R_f comme négligeable par la suite ? (/1)

Partie 2 : Traitement du signal d'une chaîne d'instrumentation (/13)

On considère désormais un signal électronique récupéré en sortie d'un convertisseur lumière-tension. Le signal v_e récupéré par le convertisseur transporte de l'information sous la fréquence 1 kHz et a une amplitude moyenne assez faible de 100 mV, étant très atténué du fait de l'absorption de l'énergie du laser par le milieu ambiant. Il est nécessaire d'amplifier ce signal pour obtenir une amplitude de sortie autour de 5 V. Cette amplification est réalisée par le montage ci-dessous (Bloc 1).
On donne $v_e = V_B - V_A$, $R_0 = 10k\Omega$, $R_1 = 1k\Omega$ et $R_2 = 4,7k\Omega$.



Bloc n°1

4.1. Rappeler les hypothèses du modèle de l'ALI et donner un ordre de grandeur du gain différentiel statique ainsi que du temps de réponse. (/1,5)
4.2. Les ALI fonctionnent-ils en régime linéaire ou saturé ? (/1)

Les ALI seront considérés comme idéaux de gain infini.

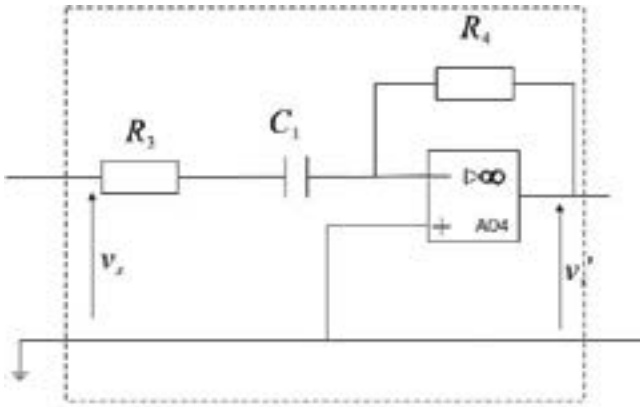
5.1. Établir la fonction de transfert $\underline{H_1}(j\omega) = \dfrac{\underline{v_i}(j\omega)}{\underline{v_e}(j\omega)}$. (/1)

5.2. Établir la fonction de transfert $\underline{H_2}(j\omega) = \dfrac{\underline{v_s}(j\omega)}{\underline{v_i}(j\omega)}$. (/1)

5.3. En déduire la fonction de transfert $\underline{H}(j\omega) = \dfrac{\underline{v_s}(j\omega)}{\underline{v_e}(j\omega)}$. (/1)

5.4. Calculer la valeur de R pour obtenir l'amplification nécessaire. (/1)

Dans les montage de conversion lumière-tension, il faut également tenir compte du "bruit électronique", ainsi que de la lumière ambiante captée en plus de la lumière du laser.
Pour remédier en partie à ce problème, on utilise un filtre passe-haut mis en sortie de l'amplificateur. Ce filtrage est réalisé par le bloc 2.
On donne $R_4 = 2k\Omega$, $C_1 = 0,1\mu F$.



Bloc n°2

6.1. Établir la fonction de transfert $\underline{H'}(j\omega) = \dfrac{\underline{v'_s}(j\omega)}{\underline{v_s}(j\omega)}$ et vérifier que ce montage correspond bien à filtre passe-haut. (/1,5)

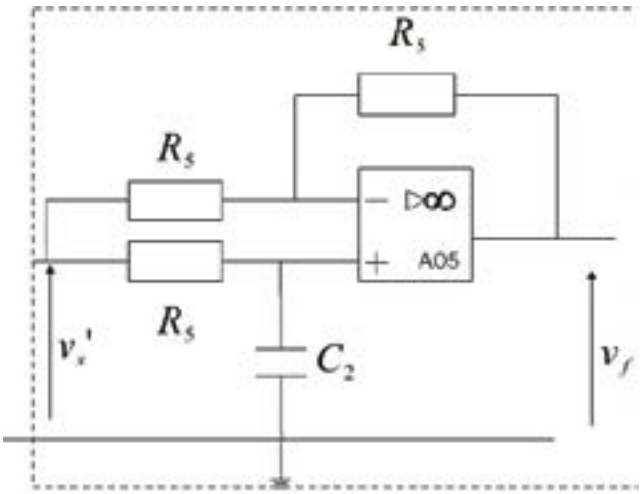
6.2. Déterminer la pulsation de coupure à -3dB et son gain statique H'_0. (/1)

6.3. Déterminer la valeur de R_3 permettant d'avoir une fréquence de coupure de 200 Hz.(/0,5)

7.1. Tracer le diagramme de Bode en phase de ce filtre. (/1)

7.2. Quel est le déphasage de v'_s par rapport à v_s en ce qui concerne l'information transportée sur la fréquence 1 kHz ? (/0,5)

Pour récupérer l'information transportée par la tension v_i, il peut aussi être utile de déphaser le signal v_s'. Cette opération est réalisée par le bloc 3.
On a $R_5 = 1k\Omega$.



Bloc n°3

8.1. Déterminer la fonction de transfert du bloc 3. (/0,75)
8.2. Déterminer la valeur de C_2 pour que v_f soit en phase avec v_i. (/0,75)

9.1. Quelles conditions doivent vérifier chaque bloc pour leur bon fonctionnement lors de leur mise en cascade. (/1)

9.2. Exprimer l'impédance d'entrée du bloc 3 et faire l'application numérique. Respecte-t-elle la condition donnée en question 9.1. ? Si non, quelle solution pouvez-vous proposer ? (/1)

Notions clés

Fonctions de transfert, stabilité d'un système d'ordre 2, ALI en régime linéaire, filtrage.

Devoir 2

Étude et test d'une chaîne de mesure (2h)

⇒ *Thèmes abordés*
- — L'amplificateur linéaire intégré en régime saturé
- — Oscillateurs de relaxation

Partie 1 : Étude d'un capteur de température (/8,5)

Dans cet exercice, on cherche à calibrer un détecteur de température qui allumerait une diode si la température mesurée est supérieure à 40 °C.

Pour cela, on utilise un montage à base d'ALI et une sonde PT100, dont la résistance R_P varie en fonction de la température et telle que $R_P < 115\Omega$ si $T < 40°C$, $R_P = 115\Omega$ si $T = 40°C$ et $R_P > 115\Omega$ si $T > 40°C$. La diode doit s'allumer quand l'ALI délivre une tension de sortie $V_{SAT} = +15V$.

On donne ci-dessous le schéma du montage. On donne $E = 10V$, $R_1 = 100\Omega$ et $R_2 = 400\Omega$. R_X est une résistance variable.
L'ALI est supposé idéal de gain infini.

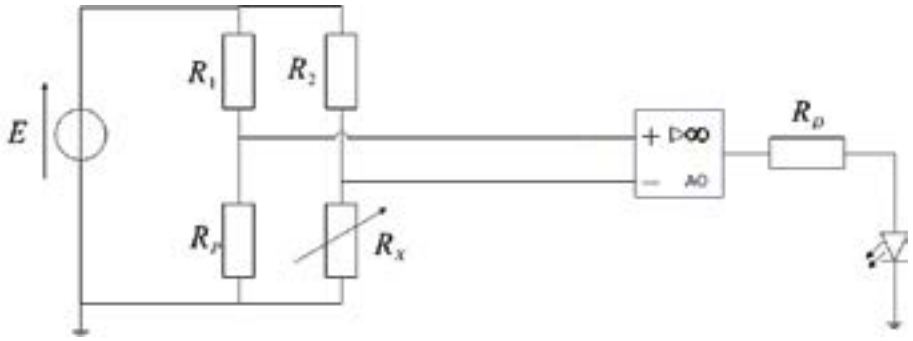


FIGURE 1 – Capteur de température

1. L'ALI fonctionne-t-il en régime linéaire ou saturé ? (/0,5)
2. Exprimer les tensions V_+ et V_- en fonction de R_1, R_2, R_X, R_P et E. (/1)
3. Exprimer R_X tel que le seuil de déclenchement en température soit égal à 40°C. Faire l'application numérique. (/1)

On s'intéresse désormais à un système de détection de température bien particulier.

En Arctique, une station météo répertorie soigneusement les températures et on cherche à calibrer un capteur de sorte que :
- le détecteur doit allumer une diode rouge si la dernière température extrêmale mesurée est au-dessus de 0°C (record de température chaude sur cette station).
- le détecteur doit allumer une diode bleue si la dernière température extrêmale mesurée est au-dessous de -34°C (record de température froide sur cette station).

L'idée est de créer ce détecteur à partir d'un comparateur à hystérésis, qui déclencherait une réponse haute (pour la diode rouge) ou basse (pour la diode bleue) de l'ALI utilisé selon les valeurs de tension de déclenchement calibrées en fonction des températures 0°C et -34°C.

Sur le schéma suivant, on cherche à déterminer la valeur de E' et la valeur de R nécessaires à cela.

La tension V_- est prélevée aux bornes d'une nouvelle thermistance à coefficient négatif dont les nouvelles valeurs de résistance R_P sont $R_{P2} = 33\Omega$ pour T = 0°C et $R_{P1} = 122\Omega$ pour T = -34°C.

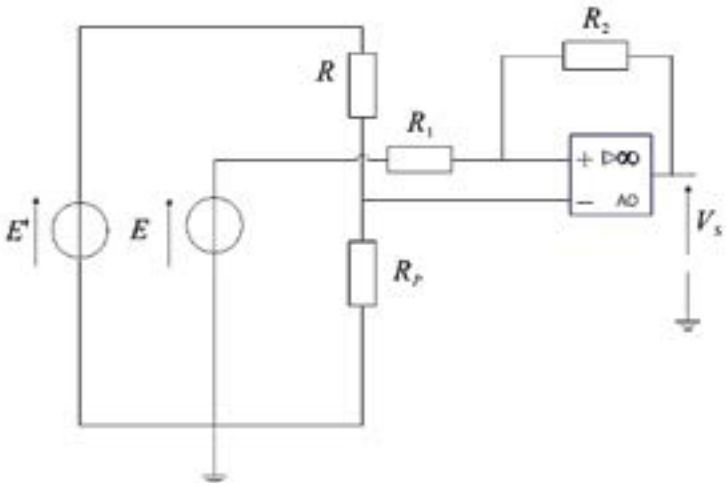


FIGURE 2 – Comparateur à hystérésis

4. Tracer la caractéristique $V_S = f(V_-)$. Identifier et exprimer en fonction de V_{SAT}, E, R_1 et R_2 une tension V_1, seuil de commutation du haut vers le bas et une tension V_2, seuil de commutation du bas vers le haut. Faire les applications numériques. (/4)

5. Déterminer V_- en fonction de R_P, E' et R. (/1)

6. Exprimer R et E' en fonction de V_1, V_2, R_{P1} et R_{P2} pour respecter les seuils de commutations précédemment établis. Faire l'application numérique. (/2)

7. Quel est l'intérêt d'un comparateur à hystérésis dans ce cas par rapport à un comparateur simple ? (/1)

Partie 2 : Générateur de rampes (/11,5)

On souhaite tester le détecteur en soumettant le bloc "comparateur à hystérésis" à un signal rampe créé à partir de l'oscillateur de relaxation ci-dessous.

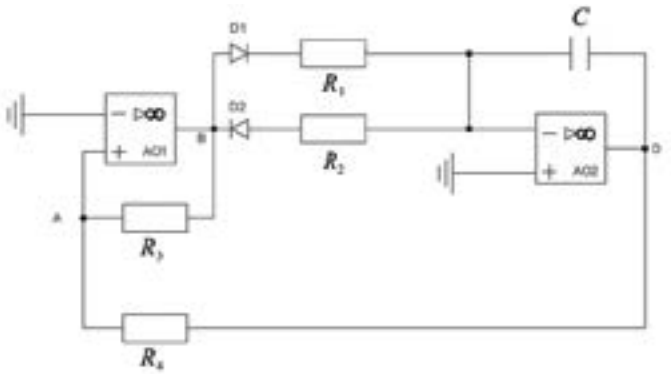


FIGURE 3 – Générateur de rampes

On admet que lorsque la sortie de l'AO1 est en position haute $V_{S1} = V_B = +V_{SAT}$, la diode D1 est passante et la diode D2 est bloquée (le courant passe par D1 et ne passe pas par D2) et que lorsque la sortie de l'AO1 est en position basse $V_{S1} = V_B = -V_{SAT}$, la diode D2 est passante et la diode D1 est bloquée (le courant passe par D2 et ne passe pas par D1).

On considère qu'à l'instant initial t=0s, $V_{S1} = +V_{SAT} = +15V$ et que le condensateur C est déchargé.

On donne également $R_1 = 1k\Omega$, $R_2 = 2k\Omega$, $R_3 = 3k\Omega$ et $C = 0,1\mu F$.

8. Déterminer la loi d'évolution de $V_D(t)$ à partir de t=0s en fonction de V_{SAT}, R_1 et C. (/2)

9. Exprimer le potentiel électrique V_A au point A en fonction de R_3, R_4, V_D et V_B. (/1,5)

10. En déduire à quel instant t_1 la sortie V_{S1} peut basculer à l'état bas $-V_{SAT}$. Exprimer t_1 en fonction de R_1, R_3, R_4 et C. (/1)

11. Déterminer la loi d'évolution de $V_D(t)$ à partir de $t = t_1$ en fonction de V_{SAT}, R_1, R_2, t_1 et C. (/2)

12. En déduire à quel instant t_2 la sortie V_{S1} peut basculer à l'état haut $+V_{SAT}$. Exprimer t_2 en fonction de R_1, R_2, R_3, R_4, t_1 et C. (/2)

13. En déduire les expressions de $V_{D_{max}}$ et $V_{D_{min}}$, les valeurs maximales et minimales du signal généré. (/1)

14. Déterminer la valeur de R_4 permettant d'avoir une amplitude $V_{D_{max}} = 13V$. (/1)

Le comparateur à hystérésis de la partie 1 est alimenté en V_- par la tension V_D créée par le générateur de la partie 2.

15. Le temps d'allumage de chaque diode (rouge et bleue) sera-t-il visible à l'oeil nu ? Si non, que pourrait-on faire pour que cela soit possible ? (/1)

Notions clés

ALI en régime saturé, montage amplificateur, montage comparateur, montage intégrateur de Miller, montage comparateur à hystérésis, potentiel électrique.

Devoir 3

Générateur de signaux sinusoïdaux (1h30-2h)

⇒ *Thèmes abordés*
- Oscillateur quasi-sinusoïdal
- Electronique numérique

Partie 1 : Oscillateur analogique (/13)

On s'intéresse dans cet exercice à un générateur de signaux sinusoïdaux, l'oscillateur de Colpitts.

L'ALI est supposé idéal de gain infini, les condensateurs et la bobine sont considérés comme idéaux.

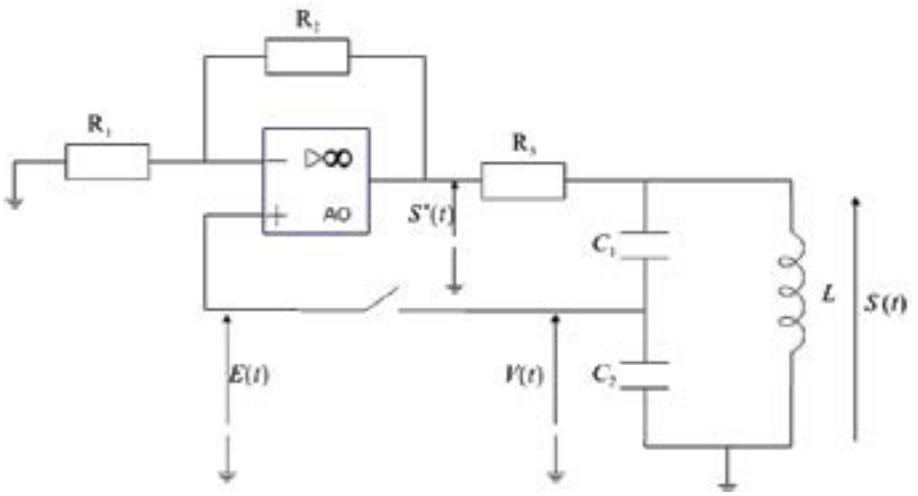


FIGURE 1 – Oscillateur de Colpitts

1. Rappeler le principe de fonctionnement d'un oscillateur (chaîne directe, chaîne retour, rôle de ces chaînes). (/2)

2.1. Établir la fonction de transfert opérationnelle $H_1(p) = \dfrac{S'(p)}{E(p)}$. (/2)

2.2. Établir la fonction de transfert $H_2(p) = \dfrac{S(p)}{S'(p)}$. (/2)

On notera $C = \dfrac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$. Effectuer les limites à hautes et basses fréquences et vérifier que cette fonction de transfert correspond bien à celle d'un filtre passe-bande.

2.3. Établir la fonction de transfert $H_3(p) = \dfrac{V(p)}{S(p)}$. (/2)

À l'instant t=0s, l'interrupteur est fermé.

3.1. Déterminer l'équation différentielle vérifiée par la tension S(t). (/2)

3.2. Établir la condition sur le rapport $\dfrac{R_2}{R_1}$ pour faire naître des oscillations, en fonction de C_1 et C_2. (/1)

3.3. Tracer la naissance des oscillations du signal s(t). Expliquer leur stabilisation. (/1)

3.4. Quelle est la fréquence des oscillations ? Faire l'application numérique pour L=150 mH, C_1=10 μF et C_2=20μF. Proposer également une valeur pour R_1 et R_2. (/1)

Partie 2 : Filtrage numérique en sortie d'ALI (/7)

On cherche à remplacer le filtrage analogique entre S'(t) et S(t) par un filtrage numérique.

Pour cela, le signal S'(t), supposé de fréquence f_0 est d'abord échantillonné par un signal de fréquence $f_e = \dfrac{1}{T_e}$.

4.1. Quelle relation doit vérifier la fréquence f_e ? (/0,5)

4.2. Décrire brièvement les étapes de numérisation d'un signal analogique. (/1)

Une fois le signal S'(t) numérisé, on cherche à le faire passer dans un filtre numérique qui répond aux critères de la fonction de transfert $H_2(p)$. Ce filtre numérique va être codé en python en suivant la méthode d'Euler.

On rappelle que la méthode d'Euler consiste à estimer les dérivées de la manière suivante :

$$\frac{dy}{dt} \approx \frac{y[k] - y[k-1]}{T_e}$$

où y[k] est le k-ième élément de la liste comportant les valeurs de y(t).

5.1. À partir de la fonction de transfert $H_2(p)$, déterminer l'équation différentielle liant S(t) et S'(t). (/1,5)

5.2. En déduire la relation de récurrence entre S[k], S[k-1], S[k-2], S'[k], S'[k-1] et les paramètres du problème. (/2)

6.1. Proposer un programme python qui code ce filtre numérique. (/1)

6.2. Proposer également un code permettant de tester le fonctionnement de ce filtrage. (/1)

Notions clés

Chaînes directes et retours d'un oscillateur, condition de Barkhausen, condition d'instabilité, saturation de l'ALI, filtrage numérique, programmation python.

Transport d'une conversation téléphonique (1h30-2h)

⇒ *Thèmes abordés*
— Transmission de l'information

Les sorties de tous les multiplieurs de ce devoir sont coefficientées par un facteur k (donné par le constructeur).

On considère une personne A ayant une conversation téléphonique avec une personne B. La voix de A est numérisée par le téléphone puis transformée en onde électromagnétique.
L'onde électromagnétique est transportée d'une antenne émettrice A1 vers une antenne réceptrice A2. Cette dernière transmet alors l'onde vers le téléphone de B, qui la convertira en signal sonore.

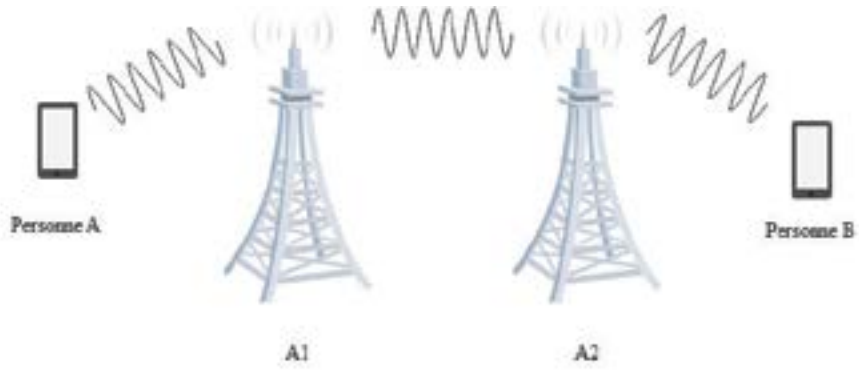


FIGURE 1 – Transmission en télécommunication

Partie 1 : Création du signal électromagnétique (/1)

On suppose dans un premier temps que le signal électromagnétique délivré par l'antenne A1 est de la même fréquence que le signal sonore de la personne A, à 3 kHz.

1. Calculer la taille que devraient avoir les antennes dans ce cas-là. Commenter et expliquer l'intérêt d'une modulation des signaux. Proposer une valeur cohérente pour la fréquence de modulation. (/1)

Partie 2 : Modulation d'amplitude à porteuse conservée (/6)

On considère donc le signal $m(t) = Mcos(\omega t)$ qu'il faut moduler et transporter depuis l'antenne A1 à l'antenne A2. Pour cela, on utilise une porteuse notée $p(t) = Pcos(\omega_p t)$.
Le schéma de principe des opérations effectuées sur ces signaux est donné ci-dessous.
On définit le taux de modulation $T = kM$.



FIGURE 2 – Schéma de principe de la MAPC

2.1. Déterminer l'expression linéarisée de s(t) en fonction de P, k, M, ω, ω_p et t. Représenter son spectre fréquentiel.(/2)

2.2. Pour p(t) maximal, déterminer les valeurs s_{max} et s_{min} de s(t) en fonction de T et P. En déduire l'expression de T en fonction de s_{max} et s_{min}. (/1,5)

2.3. En distinguant les cas T>1 et T<1, tracer le signal s(t) en justifiant les formes. Préciser dans chacun des cas si le signal peut être démodulé à partir d'un détecteur de crête. Justifier. (/2,5)

Partie 3 : Démodulation synchrone du signal (/6)

On considère ne pas être dans les conditions de démodulation par détection de crête et on procède par démodulation synchrone en utilisant un signal démodulateur $d(t) = Dcos(\omega_p t + \phi)$. On rappelle que ce signal est multiplié à s(t) avec le facteur k pour donner un signal qu'on notera v(t).

3.1. Donner l'expression linéarisée de v(t) en fonction de k, P, D,ω_p, ϕ, M, ω et t. Tracer son spectre fréquentiel. (/3)

3.2. Quelle opération doit-on effectuer après la multiplication ? En déduire qu'il existe une valeur de ϕ interdite. (/3)

Lors des modulations d'amplitude à porteuse conservée (MAPC), la démodulation synchrone est assez aisée car la porteuse est transportée avec le signal. La création du signal d(t) revient alors à isoler le signal p(t).

Seulement, transporter la porteuse implique un coût supplémentaire. Dans la pratique, la MAPS (modulation d'amplitude à porteuse supprimée) est plus utilisée et s(t) s'exprime alors s(t)=km(t)p(t).

Partie 4 : Étude du verrouillage de phase (/7)

Le signal d(t) est créé par un oscillateur local au niveau de l'antenne A2, appelée *boucle à verouillage de phase.*
Le VCO est un circuit intégré qui fournit le signal $d(t) = Dcos(\omega_d t + \phi)$ où

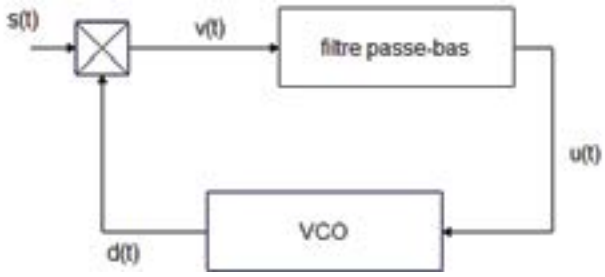


FIGURE 3 – Boucle à verrouillage de phase

$\omega_d = \omega_p + qu(t)$. Le filtre passe-bas a une pulsation de coupure $\omega_c = \omega_p$.
On récupère le signal démodulé moyennant une constante multiplicative en u(t).

4.1. Déterminer la forme linéarisée de u(t) en fonction de m(t), P, ω_d, ω_p, ϕ, k, D et t. (/1)

On suppose que le système atteint naturellement l'état d'équilibre $\omega_d = \omega_p$.

4.2. Expliquer pourquoi cet état d'équilibre ne permet pas une démodulation correcte de m(t) et retrouver la condition sur ϕ. (/1)

Le problème est alors de régler la phase ϕ pour éviter la valeur interdite trouvée précédemment. Pour cela, on utilise un montage à verrouillage de phase un peu plus complexe : la boucle de Costas en figure 4.

Les filtres passe-bas sont de pulsation de coupure $\omega_c = \omega_p$.
Le VCO implique désormais $\omega_d = \omega_p + qa(t)$.

Le but est d'obtenir a(t)=constante=0.

4.3. Déterminer l'expression du signal u(t) en fonction de m(t), P, ω_d, ω_p, ϕ, k, D et t. (/1)

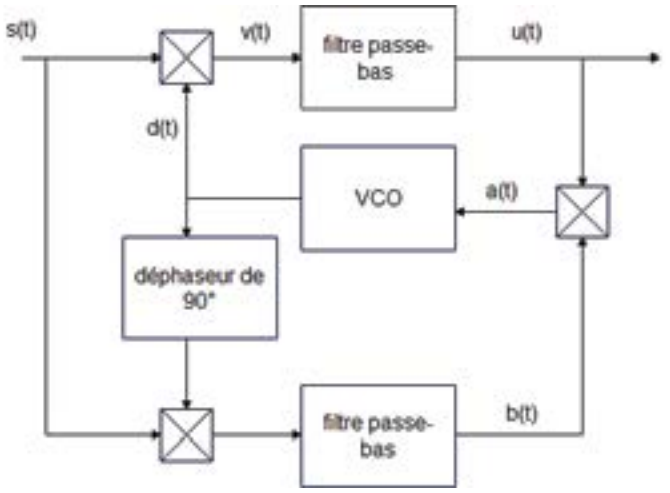


FIGURE 4 – Schéma de principe de la boucle de Costas

4.4. Déterminer l'expression du signal b(t) en fonction de m(t), P, ω_d, ω_p, ϕ, k, D et t. (/1)

4.5. En déduire l'expression non-linéarisée du signal a(t) en fonction de m(t), P, ω_d, ω_p, ϕ, k, D et t. En déduire que a(t)=0 pour $\phi_1 = 0$ ou $\phi_2 = \frac{\pi}{2}$. (/1,5)

L'état d'équilibre a(t) = 0 atteint, on imagine que la phase ϕ correspondante subit une infime variation $\phi' = \phi + d\phi$ et on étudie l'évolution du système.

4.6. Étudiez l'évolution du stystème lorsque ϕ_1 puis ϕ_2 subissent des variations infinitésimales. En déduire que seule la solution $\phi_1 = 0$ est stable. (/1)

4.7. En déduire l'expression du signal u(t), une fois ϕ stabilisé à sa valeur. Que faudrait-il faire pour récupérer exactement m(t) ? (/0,5)

Notions clés

Modulation, porteuse, modulante, démodulation synchrone.

La foudre et les vaches (1h-1h30)

⇒ *Thèmes abordés*
- Conduction électrique

Données :
- masse d'un électron $m_e = 9,1 \times 10^{-31} kg$
- intensité de pesanteur $g = 10 m.s^{-2}$
- charge élémentaire $e = 1,6 \times 10^{-19} C$
- $\overrightarrow{E} = -\overrightarrow{grad}(V)$

Dans ce devoir, on cherche à comprendre et quantifier les phénomènes de foudroiement des vaches (ou autres êtres vivants) sur les terrains agricoles. Ce devoir est décomposé en trois parties visant à amener progressivement vers la réponse à ce problème.

Partie 1 : Étude du déplacement des charges dans un conducteur (/7)

On considère N électrons de charge q=-e qui se déplacent dans un conducteur soumis à un champ électrique $\overrightarrow{E}$ d'une valeur de $1 V.m^{-1}$ à partir de t=0s. La densité volumique des électrons est notée n(q).
On considère dans un premier temps que les électrons ne sont soumis qu'à leur poids et la force électrique.

1.1. Déterminer l'équation différentielle vérifiée par la vitesse d'ensemble $\overrightarrow{v}_q$ de ces électrons (/2)
1.2. En déduire l'expression de la vitesse $\overrightarrow{v}_q$ en régime permanent. Commenter. (/1)

On introduit donc une force supplémentaire dans le bilan des forces exercées sur un électron : $\overrightarrow{F}_D = -\lambda \overrightarrow{v}_i$ où $\overrightarrow{v}_i$ est la vitesse de l'électron n°i.

1.3. Donner le nom du modèle associé à cette nouvelle force et expliquer son sens physique. Déterminer la nouvelle équation différentielle vérifiée par $\overrightarrow{v}_q$, puis son expression en régime permanent en fonction de q, λ et $\vec{E}$. (/2)
1.4. En déduire l'expression de la conductivité γ du conducteur en fonction de q, n(q) et λ. (/1)

Dans le cas où le conducteur considéré est le sol du terrain agricole, les charges se déplacent grâce à l'humidité du sol. Les porteurs de charges sont donc ioniques

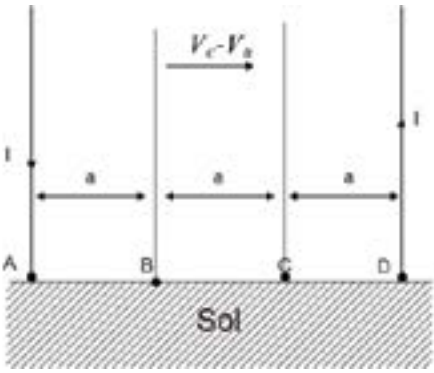
et multiples. On considère que les ions majoritaires sont K^+,Mg^{2+} et I^- à des densité respectives n(K^+), n(Mg^{2+}) et n(I^-).

1.5. Déterminer l'expression de γ_{sol} en fonction de e, λ, n(K^+), n(Mg^{2+}) et n(I^-). Expliquer la difficulté de son calcul théorique. (/1)

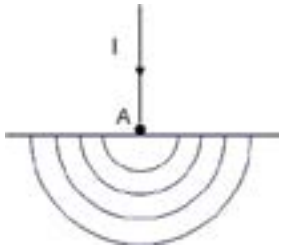
La conductivité γ_{sol} est donc mesurée de manière expérimentale par la *méthode de Wenner* (aussi appelée *méthode des pointes*).

Partie 2 : Méthode de Wenner (/8)

La méthode de Wenner consiste à planter quatre piquets conducteurs dans le sol (A, B, C et D), régulièrement espacés d'une distance a. Les piquets A et D servent à envoyer un courant de référence I dans le sol. Les piquets B et C servent à mesurer le potentiel V induit par ce courant dans le sol à deux endroits différents. La différence de potentiel $V_C - V_B$ est directement reliée à la conductivité γ_{sol}.



(a) Branchement des quatre piquets



(b) Equipotentielles pour un piquet

FIGURE 1 – Méthode de Wenner

Notre étude porte d'abord uniquement sur le piquet A dont les équipotentielles sont représentées en figure ci-dessus en supposant le piquet D non planté.

2.1. Au vu de l'allure des équipotentielles, démontrer que le vecteur densité de courant $\overrightarrow{j}_{sol}$ diffuse radialement dans le sol. En supposant que cette diffusion est isotrope, déduire que $||\overrightarrow{j}_{sol}||$ ne dépend que de r, la distance au point A. (/1,5)

2.2. En déduire l'expression de $\overrightarrow{j}_{sol}(M)$ puis de $\overrightarrow{E}_{sol}(M)$ en tout point M du sol. (/2)

2.3. En déduire les expressions des potentiels V_C^A et V_B^A lorsque seul A est planté. On prendra $V^A(r \to +\infty) = 0V$. (/1,5)

2.4. Par un raisonnement analogue, déterminer V_C^D et V_B^D lorsque seul D est planté (A non planté). (/1)

2.5. En déduire les expressions de V_C et V_B lorsque A et D sont plantés et donner l'expression de γ_{sol}. Faire l'application numérique pour $V_C - V_B = -1,5V$, a=5 m et I=1 A. (/2)

Partie 3 : Foudroiement des vaches (/5)

On considère désormais un champ avec un unique arbre où la foudre s'abat. Le courant y circule comme dans le sol, grâce à la sève et à l'eau contenue à l'intérieur. L'arbre permet donc d'injecter un courant I=20000 A dans le sol, d'une manière similaire au piquet A étudié précédemment.

La vache se situe à une distance D=20m de l'arbre. D'une manière simplifiée, elle présente deux points de contact avec le sol (ses pattes avant et ses pattes arrière). Ces deux points de contact sont assimilés aux piquets B et C étudiés précédemment distants de d=1,5m.

3.1. Calculer le potentiel au point B, les pattes avant de la vache. (/1)
3.2. Calculer le potentiel au point C, les pattes arrière de la vache. (/1)
3.3. Calculer le courant i_{vache} qui traverse la vache si celle-ci possède une résistance $R_{vache} = 800\Omega$. Quels peuvent être les effets d'un tel courant ? (/3)

Notions clés

Déplacement de charges, modèle de Drude, densité de courant, courant électrique, champ électrique.