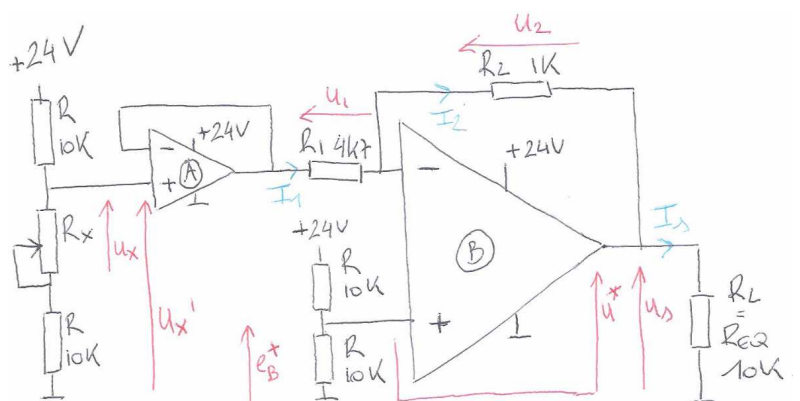
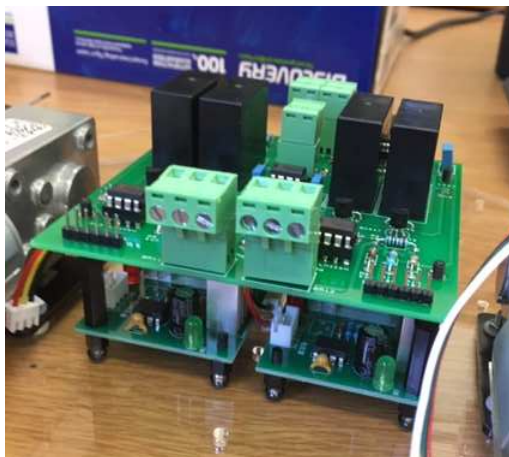
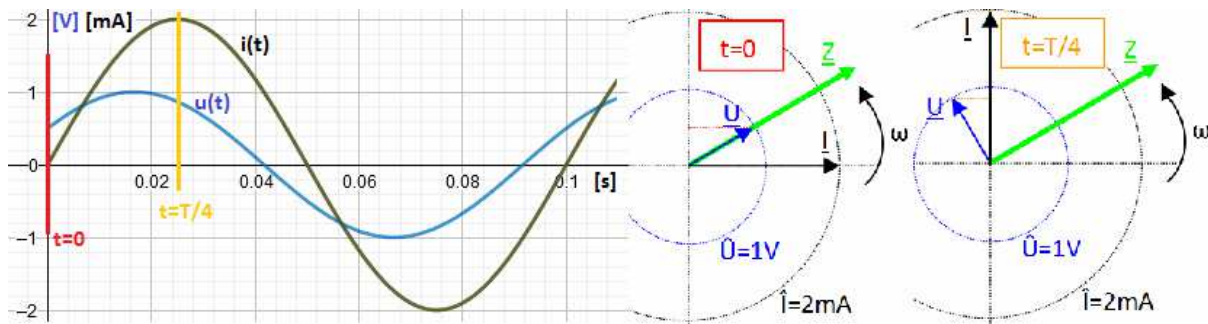


# Robotique - Syllabus 6<sup>e</sup>



# Robotique

**Ce support de cours illustre la matière abordée et met en avant les points essentiels mais ne contient pas toute la matière.**

**Il est important d'accompagner ces feuilles de prises de notes et d'exercices faits en classe.**

**Le cours de robotique est séparé en trois parties :**

**La partie scientifique et technique (S&T)**

**La partie électronique (Eo)**

**La partie automate (AUT)**

**Les UAA du cours sont :**

	<b>Forme courte</b>	<b>Forme longue</b>
<b>UAA1</b>	<b>Acquisition d'informations</b>	Manipuler les grandeurs physiques et les principes mis en jeu des capteurs de manière à maîtriser son fonctionnement et sa technologie.
<b>UAA2</b>	<b>Traitement du signal</b>	Exploiter les notions d'électronique numérique et analogique de manière à pouvoir expliciter le rôle des différents traitements de signaux étudiés.
<b>UAA3</b>	<b>Outils informatiques</b>	Exploiter les outils informatiques des composants d'un processus industriel en respectant les caractéristiques matérielles.
<b>UAA4</b>	<b>Fonctionnalités de programmation</b>	Utiliser les outils de programmation d'un automate programmable, y compris le paramétrage de l'automate, l'algorithmique et les fonctionnalités liées aux langages de programmation utilisés (ladder, grafcet, ...).
<b>UAA5</b>	<b>Vérification et mise au point</b>	Sur base d'une analyse préalable, mettre en place une procédure de manière à atteindre la fonctionnalité demandée.

**Base de planification jusqu'à la situation d'apprentissage 9**

SEM 1	Machines opératrices	Frottements, débit et pression dans une installation	Exemple d'installation de pompage
SEM2	<b>Manip / exo</b> <b>Installation opératrice</b>	Production de l'air comprimé	Exemples d'utilisation de l'air comprimé
SEM3	Mesures et contrôles dans une installation pneumatique	<b>Situation d'apprentissage 9</b>	<b>Situation d'apprentissage 9</b>

**Planification prévisionnelle jusqu'à la situation d'apprentissage 9**

Semaine	Jour	Jour	Jour

Compléter le planning prévisionnel en classe

## Partie S&T : Machines opératrices

### Fluide compressible ou incompressible

Les liquides sont considérés en pratique comme des fluides incompressibles et de masse volumique constante. Les gaz sont bien compressibles et de masse volumique variable.

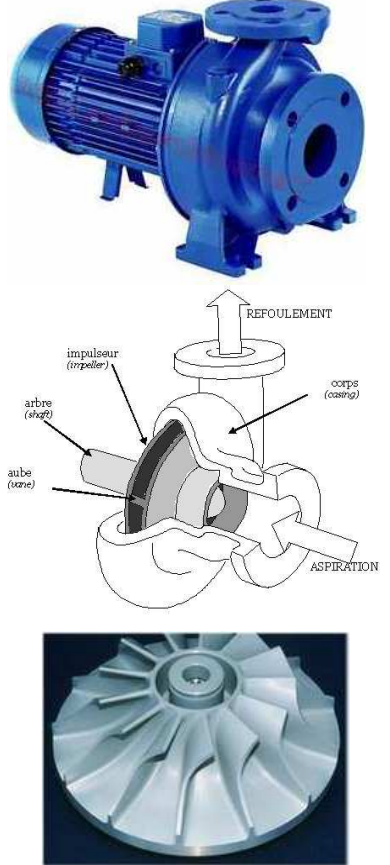
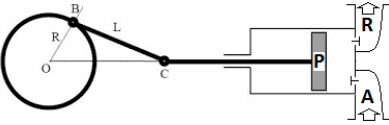
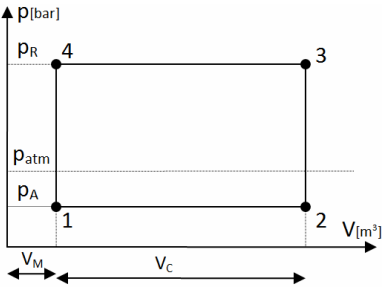
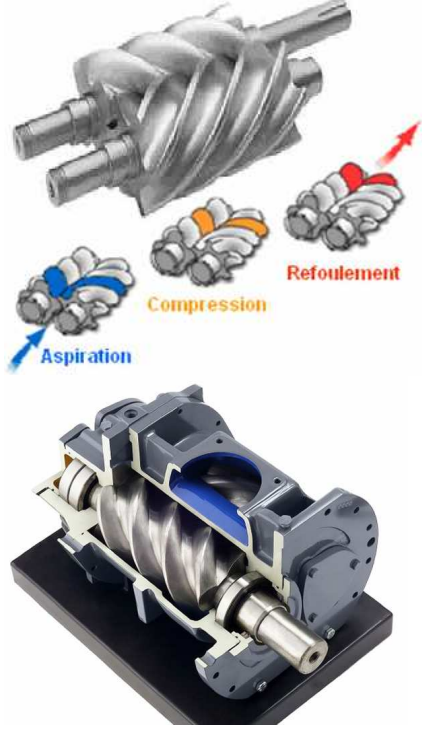
### Pompe - ventilateur - compresseur : trois familles de machines

Pour assurer un certain débit dans un circuit, on utilise une machine opératrice qui peut être classée parmi trois familles : les pompes pour les liquides, les ventilateurs pour véhiculer des gaz à pression relativement uniforme et les compresseurs.

### Turbo génératrices et machines volumétriques : deux principes de fonctionnement

Indépendamment de la famille de machine, l'énergie fluide peut être apportée au travers d'une turbo génératrice (constituée d'un ensemble d'aubes communiquant de l'énergie au fluide à l'aide d'une rotation) ou d'une machine volumétrique qui modifiera de manière cyclique le volume occupé par le fluide.

### Exemples de machines opératrices

Pompe centrifuge	Pompe à pistons	Compresseur à vis
 <p><i>Wikipédia : Pompe centrifuge, turbogénérateur radiale</i></p>	<p>Un système bielle manivelle entraîné par un moteur provoque des allers-retours du piston.</p>  <p>Un cycle contient une phase d'aspiration et une phase de refoulement.</p> <p>Le diagramme p-V montre le cycle théorique 1-2-3-4 où 1-2 est l'aspiration et 3-4 le refoulement.</p>  <p><math>V_C</math> est le volume de cylindrée.  <math>V_M</math> est le volume mort.</p>	 <p>Le gaz est emprisonné entre la vis femelle et la vis mâle et voit son volume se réduire progressivement.</p> <p><i>zoneindustrie.com, usinenouvelle.com, airpn.com</i></p>

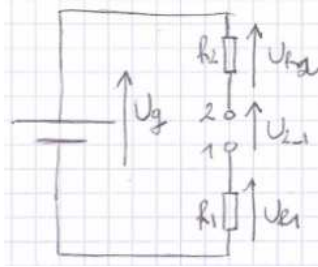
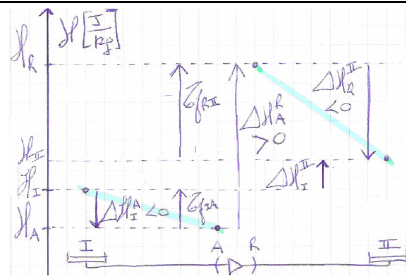
## Partie S&T : Frottements, débit et pression dans une installation

### L'effet du relèvement de charge d'une machine sur un circuit

Le relèvement de charge entre l'aspiration et le refoulement d'une machine opératrice se répartit en trois termes : le relèvement de charge entre les milieux I et II et deux termes pour les travaux de frottements. On peut imaginer une similitude électrique où la tension du générateur se répartit en une tension  $U_{2-1}$  et deux tensions aux bornes de résistances.

Le relèvement de charge d'une machine :  $\Delta H_A^R = \Delta H_A^I + \Delta H_I^{II} + \Delta H_{II}^R = Tf_{I-A} + \Delta H_I^{II} + Tf_{R-II}$

La différence de potentiel du générateur :  $U_g = U_{R1} + U_{2-1} + U_{R2} = U_{R1} + U_2 - U_1 + U_{R2}$



Suivant les conditions des milieux I et II, le terme  $\Delta H_I^{II}$  (et  $U_{2-1}$  pour sa similitude électrique) peut être positif, négatif ou nul.

Tous les autres termes sont positifs.

### Les frottements sont liés à l'énergie cinétique

Dans une conduite, les frottements sont liés à la conduite, à l'écoulement du fluide et au débit.

Les frottements longitudinaux :

$$Tf = \lambda \frac{L}{D_h} \frac{c^2}{2} \text{ [J/kg]}$$

$\lambda$  : un coefficient lié à l'écoulement

$L$  : la longueur de la conduite

$D_h$  : le diamètre hydraulique de la conduite

$c$  : la vitesse (célérité) du fluide

### Débit et pression

Le débit volumique  $q_v$  en  $[m^3/s]$  correspond à la vitesse fois la section.

Le débit massique  $q_m$  en  $[kg/s]$  correspond au débit volumique fois la masse volumique.

Lorsque la masse volumique est considérée comme constante, les débits volumique et massique sont l'image l'un de l'autre. Dès que l'on a affaire à un gaz dont la pression est sensiblement variable, on doit tenir compte de la valeur de la masse volumique.

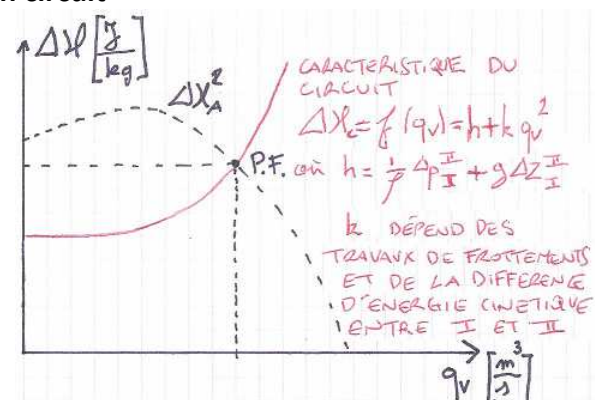
Pour mesurer la pression, on utilise un manomètre absolu (par rapport au vide) ou un manomètre relatif (à la pression atmosphérique généralement).

### Le point de fonctionnement d'une machine sur un circuit

Le relèvement de charge d'une machine de type turbogénératrice peut être représentée, pour une vitesse de rotation donnée, en fonction du débit du fluide.

D'autre part, on a vu que ce relèvement de charge va se répartir en travaux de frottements et en relèvement de charge des milieux I et II.

Le débit du point de fonctionnement P.F. est en accord avec la caractéristique de la machine et la caractéristique du circuit.



## Partie S&T : Exemple d'installation de pompe

### La hauteur maximale de pompage

Lorsqu'une pompe est située à une altitude supérieure au fluide, il apparaît en pratique une dépression au niveau de sa bride d'aspiration. En admettant que l'on puisse négliger la cote cinétique et que l'on se trouve dans le cas idéal de travaux de frottements nuls, le gain en altitude se traduit inévitablement par une perte de pression. Comme il n'est pas possible d'avoir une pression inférieure au vide, il existe une hauteur maximale de pompage. Pour l'eau, une chute de pression de 1 bar correspond à un gain altimétrique d'environ 10 m.

### La cavitation

Lorsque le liquide circulant dans les conduites fait apparaître une vaporisation partielle, il apparaît des variations de volume qui sont nuisibles pour la machine et l'installation. Pour éviter ce phénomène de cavitation on doit maintenir le fluide à l'état liquide de sorte qu'à sa température, la pression reste supérieure à sa pression de saturation associée. On doit s'arranger pour que la zone où la pression est la plus basse reste à une pression supérieure à la saturation. Cette zone est en réalité à l'intérieur de la machine, proche de la bride d'aspiration; on rajoute alors une marge par rapport aux conditions à l'aspiration.

### Quelques recommandations d'installation

On évite de surélever la pompe de plus de 5-6 m (pour environ 10 m en théorie).

On prévoit des conduites appropriées, on évite les pentes négatives et les coudes brusques.

### Exemple : Circuit en amont et circuit en aval de la pompe. Point de fonctionnement.

Imaginons que la pompe soit située à une altitude de 5 m au dessus du liquide par l'intermédiaire d'une conduite en acier de longueur égale à 20 m et de diamètre intérieur de 1 pouce. On considère pomper de l'eau à pression atmosphérique avec un débit de 20 l/min. Considérant la viscosité de l'eau froide et les caractéristiques de la conduite, on obtient une valeur du coefficient  $\lambda = 0,05$ .

Sur base du débit et du diamètre de la conduite on peut trouver la vitesse ( $c \approx 0,66$  m/s).

En considérant des frottements longitudinaux uniquement on peut calculer les pertes de charges du circuit amont. Ensuite, en négligeant la cote cinétique dans l'équation de Bernouilli, on peut calculer la pression à la bride d'aspiration ( $p_A \approx 437$  hPa en considérant  $g=9,81$  m/s<sup>2</sup>; 1 atm = 101325 Pa;  $\rho_{EAU}=1000$  kg/m<sup>3</sup>).

Considérons les éléments communs au circuit en amont de la pompe : débit, diamètre et  $\lambda$ .

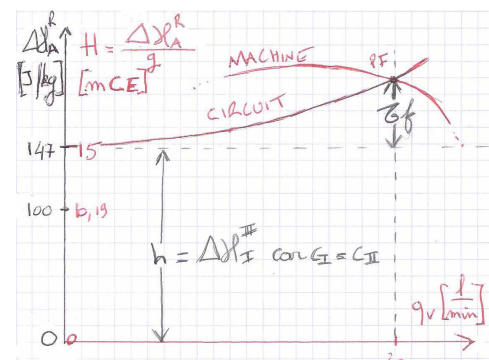
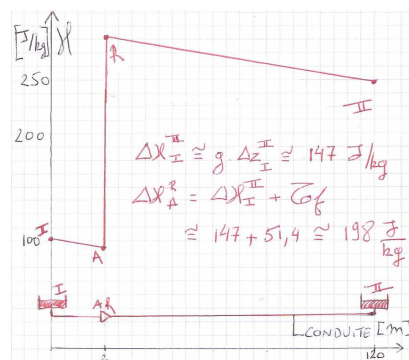
Nous supposons un gain altimétrique de 10 m entre le refoulement et l'état final du fluide.

Nous calculerons les pertes de charge en aval de la pompe pour une conduite de 100 m.

En calculant les pertes de charge en aval de la pompe, en négligeant la cote cinétique et en considérant l'état final du fluide à pression atmosphérique, on trouve la pression de refoulement de la machine ( $\approx 2423$  hPa).

On peut tracer la déperdition de charge suivant la longueur de conduite.

Le point de fonctionnement est tracé en supposant un débit de 20 l/min.

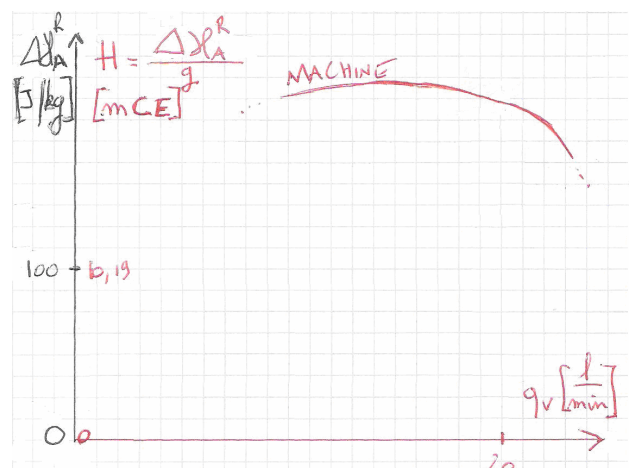


**Exercice S&T : installation opératrice**

- 1.) En considérant  $\lambda = 0,05$  pour les frottements longitudinaux et  $q_v = 20$  l/min :
  - a.) Calculez la vitesse  $c$  pour un diamètre hydraulique  $D_h = 1$  pouce.
  - b.) Calculez dans ce cas les travaux de frottements pour une conduite de 1m puis 100m.
  - c.) En considérant le milieu I situé à une altitude 10m supérieure au milieu II, quelle est la longueur d'une conduite de 1 pouce de diamètre permettant un débit naturel (sans machine opératrice) de 20 l/min ?
  - d.) En considérant que les milieux I et II se trouvent dans les mêmes conditions, que la longueur totale des conduites vaut 100 m et que la machine opératrice fonctionne avec un relèvement de charge de 50 J/kg :
    - Calculez les pertes de charge de la conduite de 20 m située en amont de la machine.
    - Représentez l'évolution de la charge en fonction de la longueur totale de conduite.
  
- 2.) Une installation a été dimensionnée pour un débit d'eau potable continu de 40 l/min
  - a.) Quelle est la consommation en  $m^3$  par an ?
  - b.) En considérant 40  $m^3$ /an par personne, combien de personnes peut-on desservir ?
  - c.) Quel doit être le diamètre de la conduite si on souhaite une vitesse de 1m/s ?
  - d.) Quel est le débit massique associé ?
  - e.) Quelle est la puissance utile que la machine doit fournir pour un relèvement de charge de 50 J/kg ? Quelle est la puissance mécanique associée si on suppose un rendement global de 80% ?
  
- 3.) En considérant un circuit idéal en amont de la machine (pas de frottements), en négligeant la cote cinétique et en supposant que la pression du milieu I est à 1 bar :
  - a.) Quelle est la pression à l'aspiration de la machine si elle se trouve à 5 m d'altitude au dessus du liquide ?
  - b.) Quelle est la hauteur maximale théorique de pompage (en supposant le vide à l'aspiration) ?
  - c.) Que devient cette hauteur si on considère 20 J/kg de frottements en amont ?
  
- 4.) Sur base des données du cours précédant (exemple d'installation de pompage) et de la caractéristique donnée de la machine, trouvez le point de fonctionnement en tenant compte de la petite modification suivante :

Un gain altimétrique de 12,5 m entre le refoulement et l'état final du fluide

Estimez les travaux de frottements.



## Partie S&T : Production de l'air comprimé

Nous allons ici nous intéresser au fluide en terme de source d'énergie plutôt qu'en terme de matière véhiculée. Un compresseur produira de l'air comprimé qui sera stocké dans un réservoir pour ensuite être envoyé à une unité de conditionnement d'air.

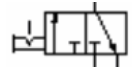
Les éléments ci-dessous sont fortement inspirés de documents et matériels didactiques festo. Notamment via [www.festo.com](http://www.festo.com) → Training → Festo4students → dossier pneumatique

### Exemple d'unité de conditionnement d'air (série D → 450 à 12500 l/min, LFR, raccord MIDI)

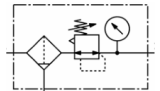


ref : 185785 W443

Distributeur de mise en circuit 3/2 manuel

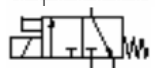


Filtre (séparateur d'eau)

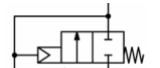


Manodétendeur (régulateur de pression)

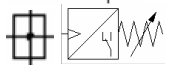
Électrodistributeur de mise en circuit 3/2 avec commande manuelle auxiliaire



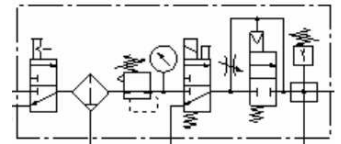
Distributeur de mise en pression progressive (utilisant un limiteur de débit)



Point de connexion et manocontacteur (ou pressostat).



Les symboles des éléments sont en général disposés horizontalement. Cependant, comme pour l'exemple de conditionnement d'air, différents symboles sont rassemblés et font apparaître les fonctionnalités.



### Exemples de compresseurs de laboratoire

Compresseur pour stations Meclab



Avec manodétendeur  
Avec purgeur d'eau  
Pression max 400 kPa  
Débit d'aspiration 20 l/min  
Réservoir 2,5 l

Compresseur pour salle de cours



Avec manodétendeur  
Avec purgeur d'eau  
Pression max 800 kPa  
Débit d'aspiration 50 l/min  
Réservoir 24 l

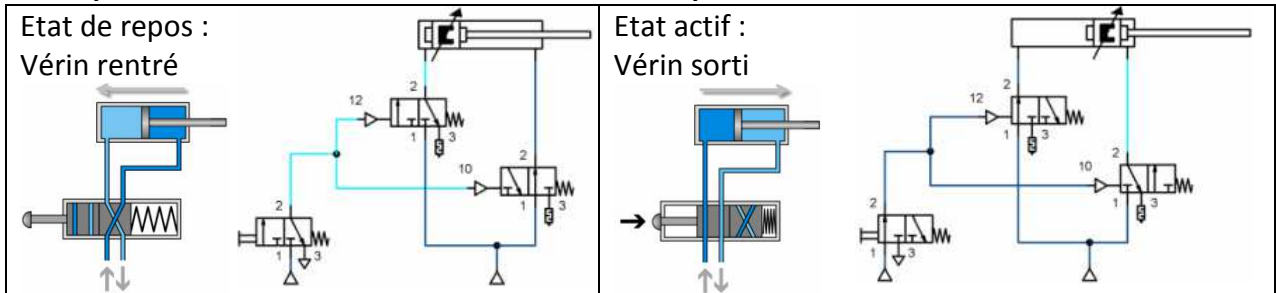
### Exercice en considérant le compresseur pour station Meclab

On considère que la masse molaire de l'air est égale à 28 g/mole, que l'air est assimilable à un gaz parfait et que l'aspiration se fait à température  $T_A = 25^\circ\text{C}$  et pression  $p_A = 1 \text{ bar}$ .

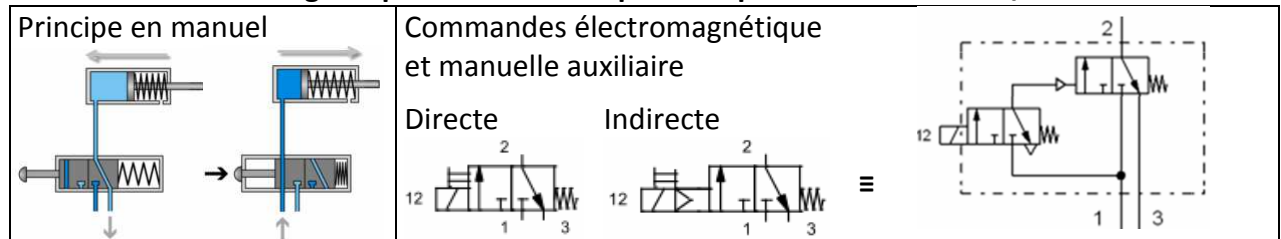
- Quel est le débit massique  $q_m$  associé au débit volumique d'aspiration de 20 l/min ?
- Quelle est la masse volumique de l'air dans ces conditions ?
- Que devient la masse volumique de l'air au refoulement si  $p = 4 \text{ bar}$  et  $T_R = T_A = 25^\circ\text{C}$  ?
- Pourquoi la cote manométrique de Bernouilli n'est pas simplement  $p/p$  pour un gaz ?

**Partie S&T : Exemples d'utilisation de l'air comprimé**

**Exemple d'une commande d'un vérin double effet par distributeurs 3/2 monostables**



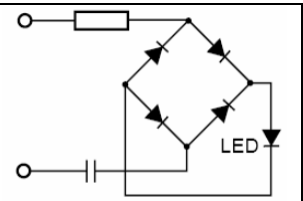
**Commande électromagnétique d'un vérin simple effet par un distributeur 3/2 monostable**



**Exemple de protection des organes de commande électrique**

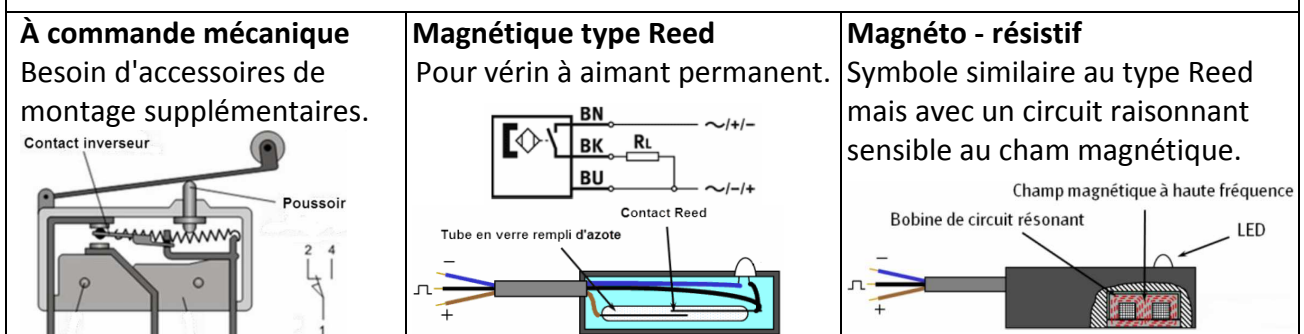
La situation d'apprentissage 6 mettait en oeuvre une diode en inverse sur le relais pour protéger le transistor.

Le circuit R-C montré ici à droite est un autre exemple de protection à placer en parallèle sur la bobine de commande du distributeur électromagnétique. Ce circuit peut être inclus dans le connecteur.



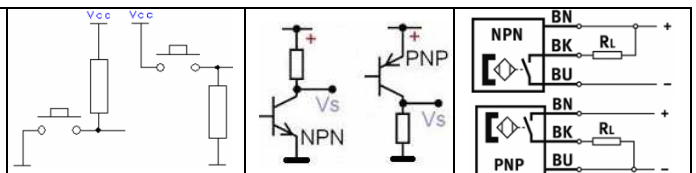
**Capteurs de fin de course**

Pour déterminer si les vérins ont atteint leur position de fin de course, il existe plusieurs types de capteurs de fin de course.



**Capteurs PNP et NPN**

Le capteur PNP (populaire en Europe) nécessite que l'automate soit câblé pour. La sortie TOR du PNP fournit du courant à la charge  $R_L$  de l'API comme à une "Pull-down".

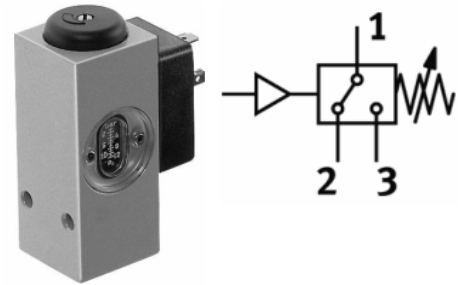


**Partie S&T : Mesures et contrôles dans une installation pneumatique**

Pour démarrer une installation pneumatique, on peut utiliser un manocontact pour ne démarrer l'installation que lorsque la pression de travail est atteinte. D'autre part, il peut être utile de surveiller la pression et le débit à différents endroits de l'installation.

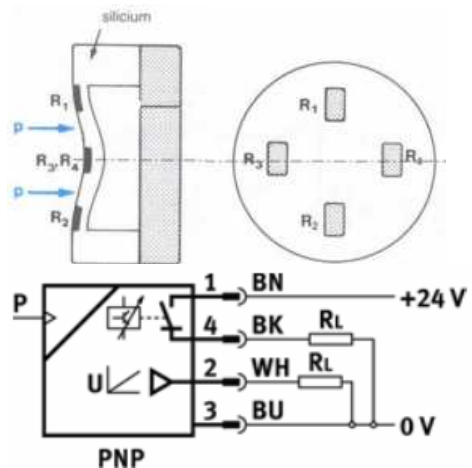
**Manocontact ou pressostat**

Le plus courant est le manocontact à pression variable. Comme sur le modèle représenté, on peut avoir un oeilleton qui permet de visualiser le réglage de la pression de commutation. Une vis de réglage permet d'ajuster la résistance d'un ressort. Lorsque la pression dépasse un seuil, la "force de pression" est supérieure à la force du ressort et il y a commutation du contact.



**Capteur de pression**

Généralement le capteur exploite l'effet piézorésistif qui apparaît sur des jauges de contraintes. La pression entraîne une déformation d'une membrane qui crée une variation de résistance. La mesure de la résistance permet de fournir un signal analogique (0-10V / 4-20mA) image de la pression.



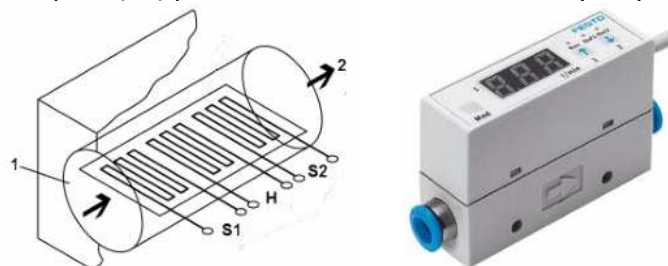
Outre la mesure analogique de pression, on peut trouver une sortie TOR qui indique si la pression a atteint le seuil paramétré. Le paramétrage du seuil avec boutons est plus simple qu'avec une vis. On peut trouver des variantes avec plusieurs seuils, avec réglage d'hystérésis,...



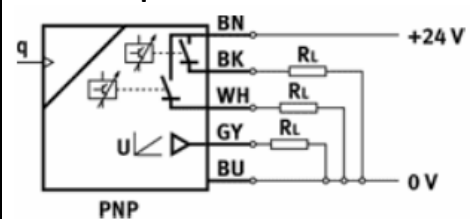
P représente la "programmation" (paramétrage) de pression.

**Capteur de débit**

Pour les fluides compressibles, on peut mesurer le débit massique en mesurant une différence de température. La résistance chauffante (H ci-dessous) est refroidie par le débit de fluide. On mesure la température avant (S1) et après (S2) pour en déduire le débit massique  $q = q_m$ .



Ci-dessous,  $q$  représente la "programmation" (paramétrage) du débit  $q$ .



Les deux sorties TOR permettent les réglages des seuils pour l'hystérésis.

**SITUATION D'APPRENTISSAGE 9**

Fiche de description

**Etude d'une installation opératrice hydraulique et d'une exploitation d'air comprimé.**
**Description**

On vous demande une collaboration dans le cadre d'une formation sur les installations hydrauliques et pneumatiques. L'idée est d'illustrer cette formation à l'aide d'un exercice récapitulatif pour l'hydraulique et d'un descriptif de "datasheet" pour la pneumatique.

En hydraulique, les notions présentées à la formation sont celles vues au cours.

En pneumatique, les notions présentées sont celles résumées au cours et sont accessibles via Internet : [www.festo.com](http://www.festo.com) → Training → Festo4students → dossier pneumatique

**Cahier des charges**

- 1.) En considérant des frottements longitudinaux uniquement, calculez la vitesse du fluide dans l'installation ainsi que les pertes de charges des circuits amont et aval.
- 2.) En négligeant les relèvements cinétiques, calculez la pression à l'aspiration.
- 3.) En négligeant la cote cinétique et en considérant l'état final du fluide à pression atmosphérique, trouvez la pression de refoulement de la machine.
- 4.) Tracez la déperdition de charge suivant la longueur de conduite.
- 5.) Tracer la caractéristique du circuit afin de trouver la vitesse de rotation de la machine pour laquelle le point de fonctionnement est à peu près en accord avec les calculs pour  $q_v = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ .
- 6.) Sur base des références 2018 que l'on vous a fourni sur le matériel pneumatique, examinez la documentation afin de constituer des fiches signalétiques.  
Ces fiches doivent contenir un descriptif des propriétés ci-dessous :  
Nom - Fonction - Technologie - Principe physique -  
Grandeurs nominales - grandeurs limites - particularité / spécificité

**Données du circuit hydraulique**

La pompe est située à une altitude de 4 m au dessus du liquide par l'intermédiaire d'une conduite en acier de longueur égale à 10 m et de diamètre intérieur de 1 pouce. On considère pomper de l'eau à pression atmosphérique avec un débit de  $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ . Considérant la viscosité de l'eau froide et les caractéristiques de la conduite, on obtient une valeur du coefficient  $\lambda = 0,05$ .

Pour le circuit aval :

Le diamètre, le débit et la valeur de  $\lambda$  sont identiques au circuit amont.

Le gain altimétrique entre le refoulement et l'état final du fluide est de 16 m.

La longueur de la conduite entre le refoulement et l'état final du fluide est de 100 m.

**Matériel pneumatique**

Code de commande	Numéro de la pièce	Fichier "datasheet"
VL/O-3-1/8-B	7803	TIGERCLASSIC_FR.PDF
LFR-1/8-D-MINI-KG	185779	D-SERIES_FR.PDF
SME-8M-DS-24V-K-2,5-OE	543862	SMX8_FR.PDF
SMT-8M-A-PS-24V-E-2,5-OE	574335	SMX8_FR.PDF
PEV-1/4-SC-OD	161760	PEV_FR.PDF
SDE1-D10-G2-H18-L-PI-M8	546134	SDE1_FR.PDF
SFET-R0500-L-WQ4-D-K3	538538	SFE_FR.PDF

**SITUATION D'APPRENTISSAGE 9**

:

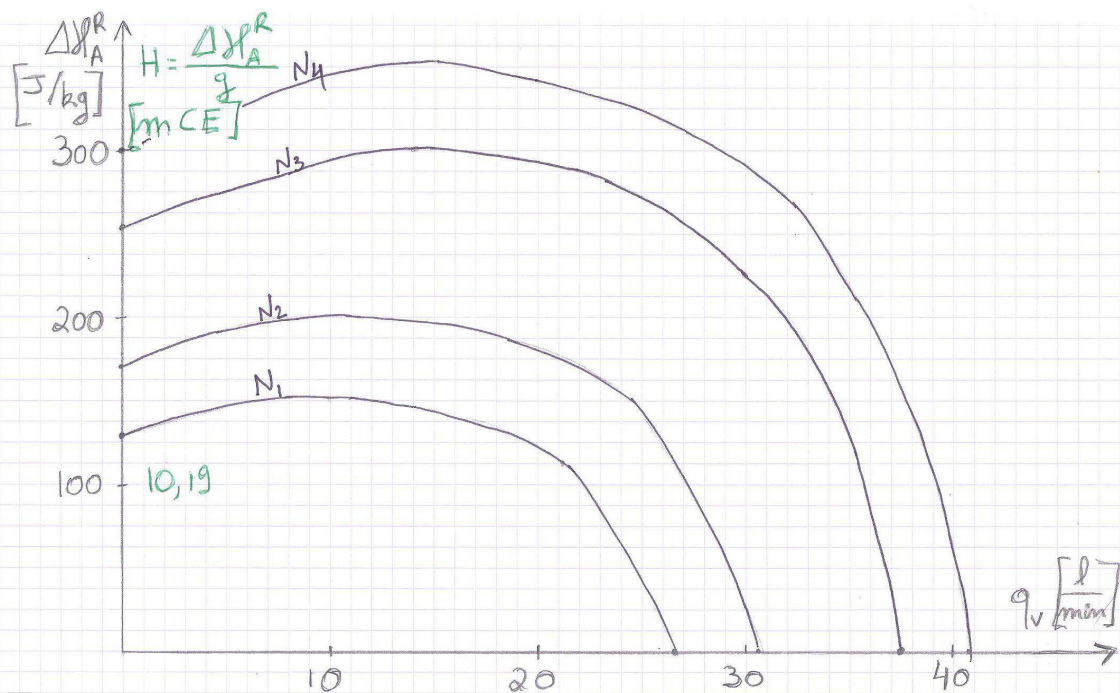
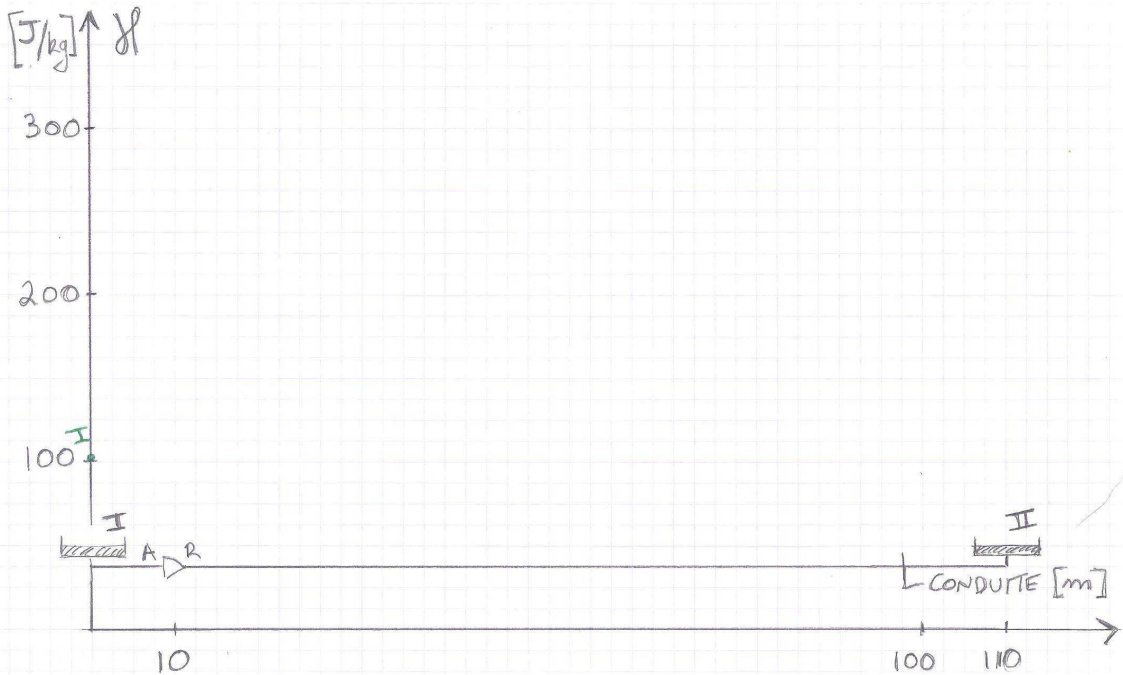
**Evaluation de l'UAA1**

Acquisition d'informations

Date	Classe	Prénom + nom

En vous basant sur la fiche de description de la situation d'apprentissage 9, rédigez ci-dessous un rapport concernant les points 1 à 5.

Les calculs peuvent être faits au verso et les points 4 et 5 ci-dessous.





**SITUATION D'APPRENTISSAGE 9**

:

**Evaluation de l'UAA1**

Acquisition d'informations

Date	Classe	Prénom + nom

En vous basant sur la fiche de description de la situation d'apprentissage 9, rédigez ci-dessous un rapport concernant le point 6.

**Base de planification jusqu'à la situation d'apprentissage 10**

SEM 1	Décomposition en série de Fourier	L'impédance	<b>Manip / exo</b> Série de Fourier / impédance
SEM2	Les effets capacitifs et inductifs	<b>Manip / exo</b> Les effets capacitifs et inductifs	L'impédance du condensateur et de la bobine
SEM3	Situation d'apprentissage 10	Situation d'apprentissage 10	

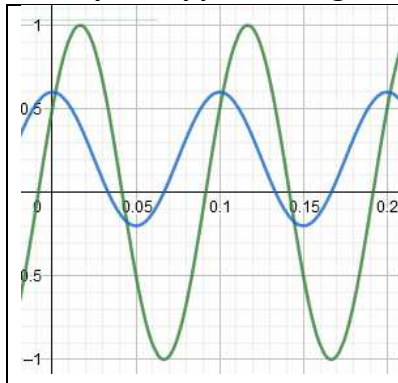
**Planification prévisionnelle jusqu'à la situation d'apprentissage 10**

Semaine	Jour	Jour	Jour

Compléter le planning prévisionnel en classe

## Partie Eo : Décomposition en série de Fourier

### Quelques rappels de trigonométrie (fréquence, amplitude, phase et valeur moyenne)



$f_1(t) = \cos\left(2\pi \cdot 10t - \frac{\pi}{3}\right)$   
 $f_2(t) = 0.2 + 0.4 \cos(2\pi \cdot 10t)$   
 Les graphs de  $f_1(t)$  et  $f_2(t)$  montrent une même fréquence  
 $f = 1/T = \omega/2\pi = 10 \text{ Hz}$   
 Les amplitudes respectives sont : 1 et 0,4  
 $f_1(t)$  est en retard de  $30^\circ$  sur  $f_2(t)$  car plus à droite dans le temps.

La valeur moyenne d'un signal  $s(t)$  peut être calculée via :

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} s(t) dt$$

Les valeurs moyennes des fonctions  $f_1(t)$  et  $f_2(t)$  sont respectivement 0 et 0,2

[www.geogebra.org/graphing](http://www.geogebra.org/graphing)

### Série de Fourier : forme trigonométrique réelle d'un signal $s(t)$ périodique ( $T=T_0$ )

$$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)$$

avec :  $a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} s(t) dt$      $b_0 = 0$

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} s(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad n \geq 1$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} s(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad n \geq 1$$

$$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} A_n \cos(n\omega_0 t - \varphi_n)$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad A_n \geq 0 \quad \forall n$$

$$\varphi_n = \arctan \frac{b_n}{a_n}$$

rem : Ajuster éventuellement l'angle sur  $[-\pi, \pi]$

Le terme général  $u_n(t) = a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t) = A_n \cos(n\omega_0 t - \varphi_n)$  est appelé **harmonique de rang n**

C'est un signal cosinusoidal d'amplitude  $A_n$  de période  $T_0/n$  (fréquence  $nf_0$ ) et de phase à l'origine  $-\varphi_n$

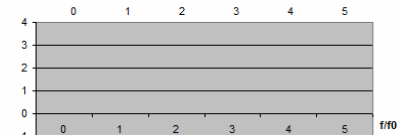
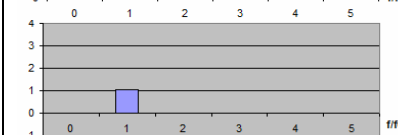
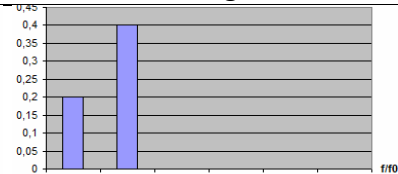
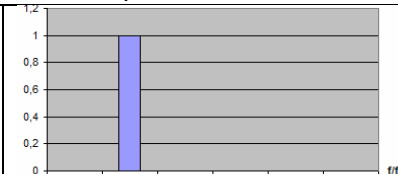
[http://w3.cran.univ-lorraine.fr/perso/hugues.garnier/Enseignement/TdS/C-TdS-Serie\\_Fourier.pdf](http://w3.cran.univ-lorraine.fr/perso/hugues.garnier/Enseignement/TdS/C-TdS-Serie_Fourier.pdf)

### Représentation temporelle et spectrale

On peut approximer une fonction périodique qui varie dans le temps par une constante  $a_0$  (la valeur moyenne) additionnée d'une somme de sinus (ou cosinus) de fréquences multiples de la fréquence de la fonction. La fonction peut alors être représentée dans le domaine fréquentiel à l'aide de raies illustrant les phases mais surtout les modules de rang n.

On voit les représentations spectrales ( $A_n$  et  $\varphi_n$ ) de  $f_1(t)$  à gauche et  $f_2(t)$  à droite.

**Exercice :** représenter le signal approché d'un carré si :  
 $a_0 = 2$ ,  $A_1 = 8/\pi$ ,  $A_2 = 0$ ,  $A_3 = 8/3\pi$   
 $\varphi_1 = \pi/2$ ,  $\varphi_2 = 0$ ,  $\varphi_3 = \pi/2$



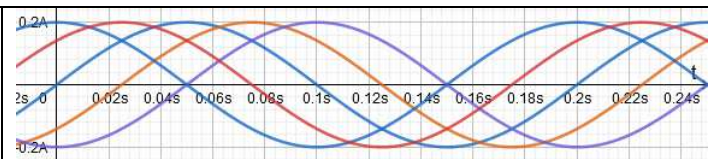
## Partie Eo : L'impédance

### Régime alternatif établi

La notion d'impédance est utilisée lorsqu'on travaille en alternatif avec des signaux (courants et tensions) purement sinusoïdaux. Lorsqu'un dipôle (ou un schéma équivalent) se comporte comme une impédance, une tension sinusoïdale à ses bornes implique que le courant qui le traverse est aussi sinusoïdal et de même fréquence. Le rapport des amplitudes des signaux tension/courant correspond au module  $Z$  de l'impédance qui est exprimé en Ohms  $[\Omega]$ .

### Module (ou norme) de l'impédance

Ici à droite des allures possibles du courant traversant une impédance  $Z=10\ \Omega$  à laquelle on applique une tension purement sinus d'amplitude 2V et de fréquence 5Hz.



Le déphasage par rapport à  $U$  est compris entre  $-\pi/2$  et  $\pi/2$

### Argument de l'impédance

L'argument de l'impédance, exprimé en radians, compris entre  $-\pi/2$  et  $\pi/2$ , correspond au déphasage que l'on retrouve entre la tension aux bornes de l'impédance et le courant qui le traverse (pour la convention récepteur). Lorsque la tension est en avance sur le courant, l'argument de l'impédance est positif. dans le cas contraire, son argument est négatif.

### Impédance complexe : coordonnées cartésiennes et coordonnées polaires

On représente classiquement une impédance dans ce qu'on appelle le plan complexe qui est défini par l'axe des Réels (l'abscisse) et l'axe des Imaginaires (l'ordonnée).

Tout point du plan complexe peut alors être défini par ses coordonnées  $(a,b)$  où  $a$  et  $b$  sont des nombres réels permettant d'exprimer la forme cartésienne de l'impédance complexe  $\underline{Z}$  :

$$\underline{Z} = a + b*j \quad \text{où } j \text{ (noté souvent } i) \text{ est le nombre imaginaire tel que } j^2 = -1$$

On représente l'impédance complexe par un vecteur dont l'origine coïncide avec l'origine de notre système et son extrémité est située aux coordonnées cartésiennes du nombre.

Comme on travaille dans un repère orthonormé, on peut définir l'argument de l'impédance par la simple relation  $\Theta_z = \arctan(b/a)$  \*.

La norme est obtenue à l'aide de la formule de Pythagore :  $Z = \sqrt{a^2 + b^2}$

Pour trouver les coordonnées cartésiennes à partir des coordonnées polaires, il suffit d'utiliser la trigonométrie du triangle rectangle :  $a = Z \cos \Theta_z$  et  $b = Z \sin \Theta_z$

### Exercices

- Trouvez la forme cartésienne et représentez  $\underline{Z}$  dans le plan complexe, si  $Z = 20\ \Omega$  et  $\Theta_z = \pi/4$
- Dessinez, en concordance de temps, la tension aux bornes de cette impédance et le courant la traversant si la tension est un sinus pur d'amplitude 2V et de fréquence 5Hz.
- Représentez  $\underline{Z} = 5 - 5j$  dans le plan complexe et trouvez sa forme polaire.

\* Pour un nombre complexe quelconque, il faut parfois ajouter la valeur  $\pi$  au résultat dépendant du quadrant. Pour les impédance ce n'est pas nécessaire car on travaille avec des parties réelles positives.

**Exercices Eo : Série de Fourier - Impédance**

- 1.) **Donnez le graphique (représentation temporelle) des fonctions suivantes :**  
 $u_1(t) = 5 \sin(10\pi t)$  [V],  $u_2(t) = 2 + 5 \sin(10\pi t)$  [V],  $u_3(t) = 5 + 2 \sin(50\pi t)$  [V]  
 $u_4(t) = 2 \cos(10\pi t)$  [V],  $u_5(t) = 5 + 2 \cos(10\pi t - \pi/2)$  [V],  $u_6(t) = 2 \cos(40\pi t - \pi/2)$  [V]
- 2.) **Donnez les représentations temporelles et spectrales des fonctions suivantes :**  
 $u_1(t) = 10 \cos(100\pi t - \pi/2)$  [V],  $u_2(t) = 2 + 2 \cos(300\pi t - \pi/2)$  [V],  $u_3(t) = u_1(t) + u_2(t)$
- 3.) **Calculez le module de l'impédance complexe  $\underline{Z}$  pour les cas ci-dessous :**
  - 3.1) l'amplitude de  $u_z$  vaut 20V, l'amplitude de  $i_z$  vaut 2A
  - 3.2)  $u_z \max = 10V$ ,  $u_z \min = 5V$ , l'amplitude de  $i_z$  vaut 2A
  - 3.3)  $\underline{Z} = 10 + 10j$  [ $\Omega$ ]
- 4.) **Calculez l'argument de l'impédance complexe  $\underline{Z}$  pour les cas ci-dessous :**
  - 4.1)  $u_z$  et  $i_z$  sont deux sinus purs
  - 4.2)  $u_z$  et  $i_z$  sont deux cosinus purs
  - 4.3)  $u_z$  est un sinus pur,  $i_z$  est un est un cosinus pur
  - 4.4)  $u_z$  est un cosinus pur,  $i_z$  est un est un sinus pur
  - 4.5)  $\underline{Z} = 10 + 10j$  [ $\Omega$ ]
  - 4.6)  $\underline{Z} = 10 - 10j$  [ $\Omega$ ]
  - 4.7) Le courant  $i_z$  est en avance de  $\pi/3$  sur la tension  $u_z$
- 5.) **Trouvez la forme cartésienne de l'impédance complexe  $\underline{Z}$  pour les cas ci-dessous :**
  - 5.1)  $Z = 100 \Omega$ ,  $\theta_z = \pi/4$
  - 5.2)  $Z = 10 \Omega$ , la tension  $u_z$  est en retard de  $\pi/4$  sur le courant  $i_z$
  - 5.3)  $Z = 10 \Omega$ , la tension  $u_z$  et le courant  $i_z$  sont en phase
- 6.) **Trouvez la forme polaire de l'impédance complexe  $\underline{Z}$  pour les cas ci-dessous :**
  - 6.1)  $\underline{Z} = 10 + 2j$  [ $\Omega$ ]
  - 6.2)  $\underline{Z} = 10 - 20j$  [ $\Omega$ ]
- 7.) **Considérant  $u_z$  un sinus pur d'amplitude 10V, dessinez le graph de  $i_z$  pour :**
  - 7.1)  $\underline{Z} = 10 + 2j$  [ $\Omega$ ]
  - 7.2)  $Z = 100 \Omega$ ,  $\theta_z = \pi/4$
  - 7.3)  $i_z$  en avance de  $\pi/2$  sur  $u_z$  et  $Z = 10 \Omega$

**Partie Eo : Les effets capacitif et inductifs****Formule générale du condensateur :  $q = Cu$** 

La charge électrique  $q$  stockée au sein d'un condensateur  $C$  sera proportionnelle à la tension  $u$  aux bornes du condensateur et à la valeur de  $C$  :  $q = Cu$

Les unités sont respectivement le coulomb [C], le farad [F], le volt [V].

On peut faire une analogie entre la loi des gaz parfaits et notre formule du condensateur :

$pV = nRT$  que l'on réécrit  $(RT)n = Vp$  pour mettre en regard de  $q = Cu$ .

Au facteur  $(RT)$  près, on peut dire que  $V$  permet de stocker une quantité  $n$  de gaz sous l'effet d'une pression  $p$ . De la même manière, on peut dire que  $C$  permet de stocker une charge électrique  $q$  de sous l'effet d'une tension  $u$ .

Si on dérive par rapport au temps :  $dq/dt = i = C du/dt$  (la convention récepteur est utilisée).

**Condensateur plan**

On peut faire référence à la formule  $C = \epsilon^*(S/e)$  où  $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$  = la permittivité du diélectrique entre les armatures,  $S$  la surface des armatures et  $e$  la distance entre les armatures.

**Formule pratique du solénoïde (ou bobine, inductance) :  $u = + L*(di/dt)$** 

Le signe + est utilisé pour la convention récepteur, cependant on trouve traditionnellement le signe - qui dérive de la loi de Lenz-Faraday.

Pour une inductance pure (et immobile), la tension à ses bornes est proportionnelle à la "vitesse de variation du courant". Comme le courant traversant une bobine est l'image du champ magnétique qui s'y trouve, une variation de courant correspond à une variation du champ magnétique. On a alors aussi une variation du flux de ce champ magnétique au travers des spires de la bobine ce qui est le siège d'une force électromotrice.

Les bobines réelles font apparaître une résistance électrique qui explique la situation où l'on retrouve à la fois une tension constante et un courant constant au sein de la bobine.

**Le capteur capacitif et le capteur inductif**

On peut mesurer une grandeur physique en exploitant les relations mathématiques qui relient les grandeurs et les paramètres du capteur. Beaucoup de possibilités existent.

On peut par exemple réaliser un capteur de présence sur le principe de la capacité. On utilise des armatures dont la disposition est telle pour que la présence d'un objet à proximité participera à la valeur du diélectrique. En mesurant la capacité, on mesure l'évolution de la permittivité du diélectrique qui traduit la proximité de l'objet.

On peut également réaliser un capteur qui repose sur le principe de l'inductance. On sait que la valeur de l'inductance dépend de sa géométrie mais aussi de la perméabilité magnétique.

Si on veut détecter la proximité d'un objet, on peut laisser l'objet influencer la perméabilité.

**Particularités des capteurs capacitifs et inductifs**

Les capteurs inductifs sont moins influencés par les contacts matériels que les capteurs capacitifs. Ils sont en général indépendants de la température, de l'humidité, ...

Les capteurs capacitifs sont indépendants des propriétés magnétiques de l'objet et conviennent pour des objets métalliques ou non.

**Exercices Eo : Les effets capacitif et inductifs**

- 1.) Quelle est la charge stockée par un condensateur de 1 mF sous une tension de 24V ?
- 2.) En supposons que l'on décharge un condensateur de 470  $\mu$ F à l'aide d'un courant constant de 100 mA, combien de temps faut-il pour passer de 24V à 0V ?
- 3.) Pourquoi n'a-t-on jamais de discontinuité de tension aux bornes d'un condensateur ?
- 4.) En nous basant sur le condensateur plan, que devient la capacité si on divise par deux la distance entre les armatures ?
- 5.) En utilisant la formule du condensateur plan, où :  
 $S = 1 \text{ cm}^2$ ,  $e = 0,1 \text{ mm}$ ,  $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ A}^2\text{s}^4\text{kg}^{-1}\text{m}^{-3}$ ,  $\epsilon_r \approx 8$  (diélectrique en mica)  
Calculez la valeur du condensateur avec et sans le diélectrique en mica.
- 6.) Une inductance de 1mH voit son courant augmenter progressivement de 0 à 1A sur un intervalle de temps de 1 $\mu$ s. Quelle est la tension appliquée à ses bornes ?
- 7.) Une diode de roue libre placée en parallèle sur une bobine limite la surtension (inverse) de celle-ci à 0,7V. Combien de temps faut-il au minimum pour que le courant qui traverse la bobine passe de 100 mA à 0 ?
- 8.) Que se passe-t-il si on place une bobine de valeur 10 fois plus élevée à laquelle est appliquée une tension constante à ses bornes ?
- 9.) Tentez de dessiner l'allure de  $i(t)$  en concordance de temps avec la tension  $u(t)$  si  $u(t)$  est un sinus pur de moyenne nulle, de fréquence 50 Hz et d'amplitude de 325V.  $u(t)$  est la tension appliquée à un condensateur de 10 nF,  $i(t)$  le courant la traversant.
- 10.) Tentez de dessiner une allure de  $i(t)$  en concordance de temps avec la tension  $u(t)$  si  $u(t)$  est un sinus pur de moyenne nulle, de fréquence 50 Hz et d'amplitude de 325V.  $u(t)$  est la tension appliquée à une bobine de 10mH,  $i(t)$  le courant la traversant.

**Partie Eo : L'impédance du condensateur et de la bobine****Rappel sur les impédances complexes :  $\underline{U} = \underline{Z} * \underline{I}$** 

En régime purement sinusoïdal, le module de l'impédance correspond au rapport des amplitudes de  $u(t)$  et  $i(t)$  où  $u(t)$  est la tension aux bornes de l'impédance et  $i(t)$  le courant la traversant. L'argument de l'impédance correspond à la phase de  $u(t)$  moins la phase de  $i(t)$ .

**L'impédance du condensateur**

On peut partir de la formule générale du condensateur et poser arbitrairement une expression sinusoïdale de la tension  $u(t)$  aux bornes de celui-ci. Comme le courant  $i(t)$  vaut  $C$  multiplié par la dérivée de  $u(t)$  en fonction du temps, on peut trouver l'expression de  $i(t)$ .

Par exemple  $u(t) = 10 \sin(100\pi * t) \rightarrow i(t) = C * 10 \cos(100\pi * t) * 100\pi = \omega C * 10 \sin(100\pi * t + \pi/2)$

En faisant le rapport des amplitudes de  $u(t)$  et de  $i(t)$  on trouve le module de  $Z_C = 1 / \omega C$ .

En faisant la différence entre les phases de  $u(t)$  et de  $i(t)$ , on trouve l'argument  $\Theta_Z = -\pi/2$ .

L'impédance complexe  $\underline{Z}_C$  est alors  $1/j\omega C = - (1/\omega C) * j$ .

On peut remarquer que l'ajout d'une constante à  $u(t)$  ne modifie pas sa dérivée et donc l'expression de  $i(t)$  reste inchangée. On dit qu'un signal est composé d'une composante DC (la valeur moyenne) et d'une composante AC. Seule, la composante AC nous intéresse ici pour calculer l'amplitude du courant  $i(t)$ .

**L'impédance de la bobine**

On peut partir de la formule pratique de la bobine et poser arbitrairement une expression sinusoïdale du courant  $i(t)$ . Comme la tension aux bornes de la bobine  $u(t)$  vaut  $L$  multiplié par la dérivée de  $i(t)$  en fonction du temps, on peut trouver l'expression de  $u(t)$ .

Par exemple  $i(t) = 2 \sin(100\pi * t) \rightarrow u(t) = L * 2 \cos(100\pi * t) * 100\pi = \omega L * 2 \sin(100\pi * t + \pi/2)$

En faisant le rapport des amplitudes de  $u(t)$  et de  $i(t)$  on trouve le module de  $Z_L = \omega L$ .

En faisant la différence entre les phases de  $u(t)$  et de  $i(t)$ , on trouve l'argument  $\Theta_Z = +\pi/2$ .

L'impédance complexe  $\underline{Z}_L$  est alors  $j\omega L$ .

On peut remarquer que l'ajout d'une constante à  $i(t)$  ne modifie pas sa dérivée et donc l'expression de  $u(t)$  reste inchangée. Il est souvent fréquent de manipuler des courants de valeur moyenne nulle. Les notions de composantes DC et AC sont davantage utilisées pour des signaux en tension qui sont plus faciles à manipuler que des signaux en courant.

**Application d'un signal quelconque à un condensateur ou à une bobine**

Nous avons vu qu'un signal périodique peut être décomposé, suivant la série de Fourier, en une constante plus une somme de sinusoïdes de fréquences multiples de la fondamentale.

En appliquant par exemple un signal quelconque  $u(t)$  aux bornes d'un condensateur, on doit prendre en compte que l'impédance du condensateur varie avec la fréquence. Chaque terme de l'expression de  $u(t)$  permet, sur base de l'impédance à la fréquence correspondante, de trouver un terme qui participera à l'expression du courant  $i(t)$  traversant le condensateur.

Exemple :  $C = 1\text{nF}$ ,  $u(t) = 5 * \sin(1t) + 2 * \sin(100t)$  [V]  
 $\rightarrow Z_C(\omega=1 \text{ rad/s}) = 10^9 \Omega$ ,  $Z_C(\omega=100 \text{ rad/s}) = 10^7 \Omega$   
 $\rightarrow i(t) = (5/10^9) * \sin(1t + \pi/2) + (2/10^7) * \sin(100t + \pi/2)$

<b>SITUATION D'APPRENTISSAGE 10</b>		Fiche de description
<b>Etude de signaux électriques par les impédances et la série de Fourier.</b>		
<b>Description</b>		
Dans le cadre d'un projet, on souhaite étudier l'influence de certains signaux appliqués sur des composants spécifiques :		
A. On désire un signal $u_C(t)$ triangulaire aux bornes d'un condensateur de $10\mu\text{F}$ . $u_C(t)$ reste compris entre 0 et 24V, la valeur moyenne est 12V et la période $T = 0,1\text{s}$ .		
B. On désire un signal $i_L(t)$ proche d'un signal carré traversant une inductance de $100\text{mH}$ . $i_L(t)$ reste compris entre 0 et 1A, le rapport cyclique vaut 50% et la période $T = 1\text{s}$ .		
<b>Cahier des charges</b>		
1.)	Dessinez l'allure de $u_C(t)$ en reliant les points $(0, 12)$ ; $(T/4, 24)$ ; $(3T/4, 0)$ ; $(T, 12)$	
2.)	Sur base de la formule générale du condensateur, représentez, en concordance de temps avec $u_C(t)$ , le courant $i_C(t)$ circulant dans le condensateur.	
3.)	En vous appuyant éventuellement d'une aide logicielle ( <a href="http://www.geogebra.org">www.geogebra.org</a> , excell,...), observez l'allure approchée d'un triangle limité à l'harmonique 7.	
4.)	Trouvez l'expression approchée $u_{C^*}(t)$ (jusqu'à l'harmonique 7) du triangle en tenant compte des caractéristiques de $u_C(t)$ : moyenne, période, valeur max.	
5.)	Trouvez l'expression du courant $i_{C^*}(t)$ si on applique $u_{C^*}(t)$ au condensateur. Utilisez deux méthodes : Les impédances et les dérivées.	
6.)	Donnez les allures temporelles (en concordance de temps) de $i_{C^*}(t)$ et de $u_{C^*}(t)$ ainsi que leurs représentations spectrales.	
7.)	Dessinez l'allure du signal $i_L(t)$ en considérant des pentes de $\pm 1\text{A/ms}$ pour éviter la discontinuité des flancs. Dessinez en concordance de temps l'allure de la tension $u_L(t)$ aux bornes de la bobine.	
8.)	Trouvez l'expression approchée $i_{L^*}(t)$ (jusqu'à l'harmonique 7) du carré en tenant compte des caractéristiques de $i_L(t)$ : moyenne, période, valeur max.	
9.)	Donnez les allures temporelles (en concordance de temps) de $i_{L^*}(t)$ et de $u_{L^*}(t)$ ainsi que leurs représentations spectrales.	
<b>Formulaire</b>		
La décomposition des fonctions triangle et carré ci-dessous correspond à une moyenne nulle et une valeur max de 1.		Dérivée de sinus et cosinus :
$x_{\text{triangle}}(t) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{\sin((2k+1)\omega t)}{(2k+1)^2}$ $= \frac{8}{\pi^2} \left( \sin(\omega t) - \frac{1}{9} \sin(3\omega t) + \frac{1}{25} \sin(5\omega t) - \dots \right)$		$\frac{\partial}{\partial t} \sin(\omega t + \varphi) = \omega \cos(\omega t + \varphi)$ $\frac{\partial}{\partial t} \cos(\omega t + \varphi) = -\omega \sin(\omega t + \varphi)$
$x_{\text{carré}}(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin((2k+1)2\pi f t)}{(2k+1)}$ $= \frac{4}{\pi} \left( \sin(2\pi f t) + \frac{1}{3} \sin(6\pi f t) + \frac{1}{5} \sin(10\pi f t) + \dots \right)$		Liens entre sinus et cosinus :
$\omega$ et $f$ sont la pulsation et la fréquence du signal d'origine.		$\sin(\omega t) = \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$ $\cos(\omega t) = \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$
		Rem : le cosinus est en avance de $\pi/2$ sur le sinus

**SITUATION D'APPRENTISSAGE 10**

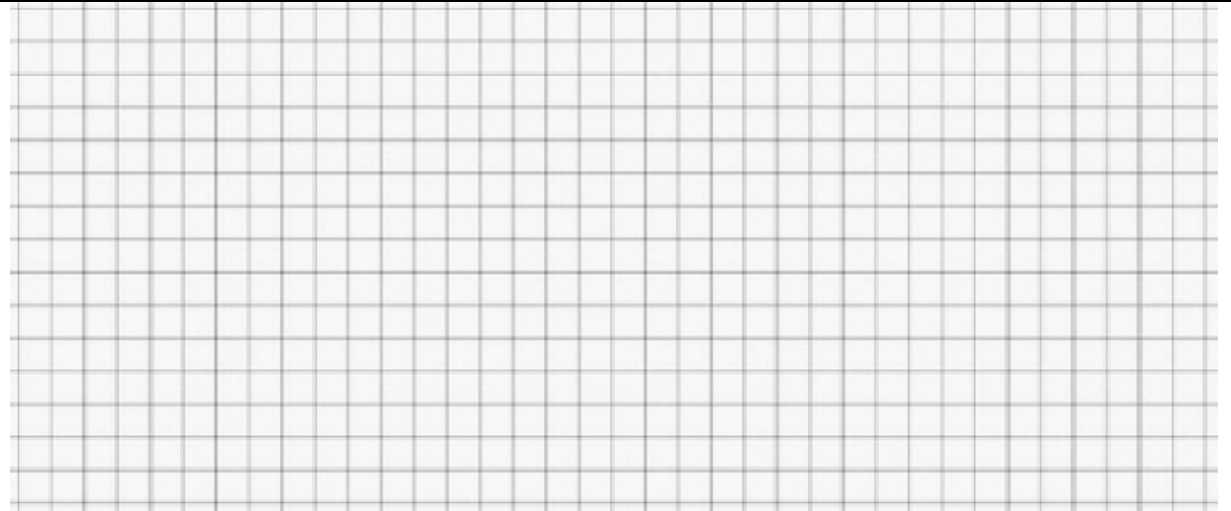
:

**Evaluation de l'UAA2**

Traitement du signal

Date	Classe	Prénom + nom

En vous basant sur la fiche de description de la situation d'apprentissage 10, rédigez ci-dessous un rapport concernant les points 1 à 6.

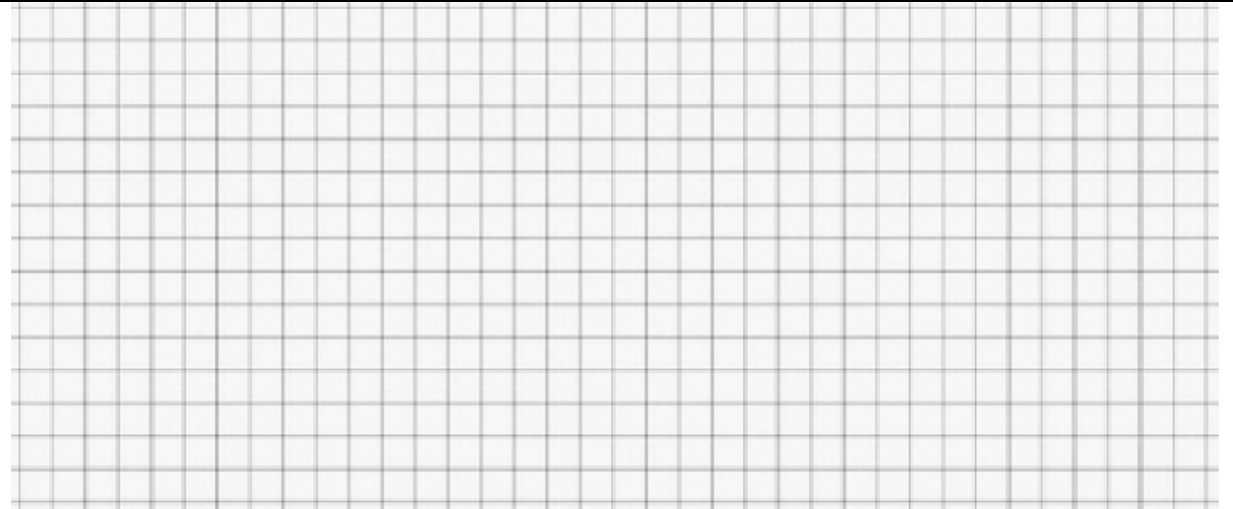


**SITUATION D'APPRENTISSAGE 10** :**Evaluation de l'UAA2**

Traitement du signal

Date	Classe	Prénom + nom

En vous basant sur la fiche de description de la situation d'apprentissage 10, rédigez ci-dessous un rapport concernant les points 7 à 9.



**Base de planification jusqu'à la situation d'apprentissage 11**

SEM 1	Fonction de transfert d'un filtre	Diagrammes de Bode d'un filtre du premier ordre	<b>Manip / exo</b> Les filtres
SEM2	L'ampli opérationnel idéal et le montage suiveur	<b>Manip / exo</b> Manipulation sur le montage suiveur	Le montage non-inverseur + manipulation
SEM3	Alim symétrique : inverseur et sommateur-inverseur	Alimentation asymétrique d'un montage inverseur	Filtres à AOP
SEM4	Exercices sur les AOP	<b>Situation d'apprentissage 11</b>	<b>Situation d'apprentissage 11</b>

**Planification prévisionnelle jusqu'à la situation d'apprentissage 11**

Semaine	Jour	Jour	Jour

Compléter le planning prévisionnel en classe

## Partie Eo : Fonction de transfert d'un filtre

### Que signifie "fonction de transfert d'un filtre" ?

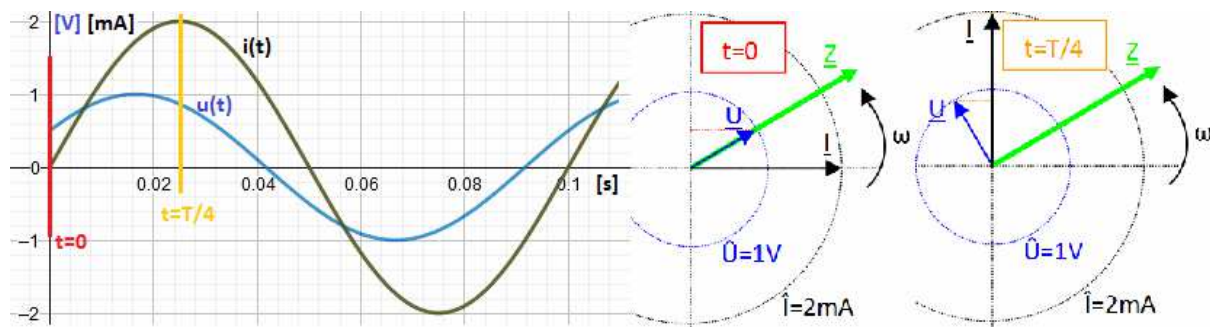
En électronique lorsqu'on parle d'un filtre, on sous-entend un filtre sur les fréquences. Nous avons vu que le condensateur et la bobine ont une impédance qui varie en fonction de la fréquence. Dans ce cas, ces composants peuvent servir à fabriquer un filtre. Le filtre est un circuit qui reçoit un signal d'entrée quelconque et qui fournit en sortie ce signal filtré. Les signaux sont en général des tensions électriques plus faciles à manipuler. Si on fait le rapport entre le signal de sortie et le signal d'entrée, on trouve une expression complexe qui varie en fonction de la fréquence. Cette expression complexe est la fonction de transfert (complexe) du circuit, on la note souvent  $\underline{T}$ ,  $\underline{H}$  ou même  $\underline{H}_u$  (pour des tensions).

### La notion de vecteurs tournants et d'impédance complexe d'un circuit

Lorsqu'on applique une tension sinusoïde  $u(t)$  à une impédance complexe  $\underline{Z}$ , il apparaît un courant sinusoïdal  $i(t)$  de même fréquence. Considérant l'impédance à la fréquence en question, le rapport des amplitudes de  $u(t)$  et de  $i(t)$  correspond au module de  $\underline{Z}$  et le déphasage entre  $u(t)$  et  $i(t)$  correspond à l'argument de  $\underline{Z}$ . Pour chaque composante sinus comprise dans un signal, on peut associer un vecteur tournant dans le plan complexe à pulsation  $\omega$ . L'impédance complexe à cette même fréquence est alors le rapport des vecteurs  $\underline{U}$  et  $\underline{I}$  tournant à la même pulsation  $\omega$ .

En faisant une projection des vecteurs tournants sur un axe (par exemple l'axe des imaginaires), on peut voir se dessiner l'évolution temporelle des signaux associés.

Illustration d'un signal  $u(t)$  (amplitude 1V,  $f=10\text{Hz}$ ) appliqué à  $Z$  ( $Z=500\Omega$ ,  $\Theta_z = \pi/6$ ) :



### Exemple de filtre : le filtre RC

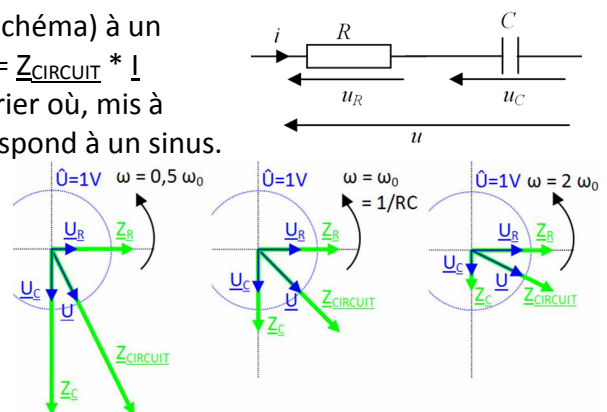
En appliquant un signal d'entrée  $u_e$  (noté  $u$  sur le schéma) à un circuit RC série, il apparaît un courant  $i$  tel que  $\underline{U}_e = \underline{Z}_{\text{CIRCUIT}} * \underline{I}$ .  $u_e$  et  $i$  sont décomposables suivant la série de Fourier où, mis à part la composante DC, chaque composante correspond à un sinus.

Si on considère la sortie  $u_s = u_c$ , on peut trouver l'expression de la fonction de transfert :

$$\underline{H}_u = \frac{\underline{U}_s}{\underline{U}_e} = \frac{\underline{Z}_C * \underline{I}}{(\underline{Z}_{\text{CIRCUIT}} * \underline{I})} = \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_{\text{CIRCUIT}}}$$

$$= \frac{1/j\omega C}{R + (1/j\omega C)} = \frac{1}{1 + j\omega CR}$$

En série, les impédances complexes et les tensions (loi des mailles) s'additionnent.



## Partie Eo : Diagrammes de Bode d'un filtre du premier ordre

L'expression de la fonction de transfert  $\underline{H}_u(\omega)$  exprime le comportement du filtre pour différentes fréquences. Les diagrammes de Bode représentent de manière graphique la réponse en fréquence du filtre.

On pourrait se contenter de représenter simplement les graphiques du module de  $\underline{H}_u$  et de l'argument de  $\underline{H}_u$  en fonction de la fréquence ; cependant pour les diagrammes de Bode :

- L'abscisse (les fréquences) utilise une échelle logarithmique
- L'ordonnée (le gain en tension ou la phase) utilise une échelle linéaire
- On utilise un papier dit "semi-logarithmique"
- On représente le gain en tension  $G_u = 20 \log(H_u)$  à la place du module de  $\underline{H}_u$ .
- On représente l'argument de  $\underline{H}_u$  sur un autre graphique appelé le glissement de phase.

### L'ordre d'un filtre

L'ordre d'un filtre est lié à l'expression de la fonction de transfert et donc indirectement au circuit électrique. Pour un circuit RC, l'expression de la fonction de transfert est relativement simple et correspond à un filtre du 1<sup>er</sup> ordre. Pour un 1<sup>er</sup> ordre, on observe une pente (positive ou négative) de 20 dB/décade, pour un 2<sup>ème</sup> ordre de 40 dB/décade, ...

### Exemple de diagrammes de Bode d'un filtre RC (passe-bas) du 1er ordre

L'exemple correspond à une fréquence de coupure  $f = f_0 = f_c = 200$  Hz.

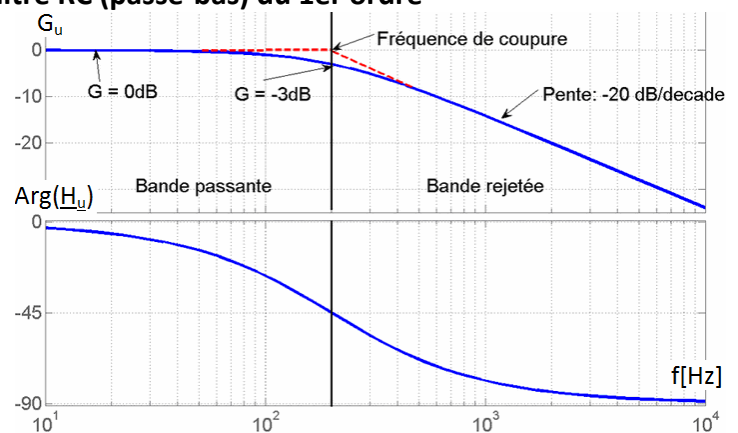
Celle-ci est reliée à la pulsation de coupure par :  $\omega_0 = 2\pi f_0 = \omega_c = 2\pi f_c$

Le diagramme de Fresnel montre qu'à la coupure, R et C ont une impédance de même module.

$H_u$  vaut alors  $1/\sqrt{2} \rightarrow G_u \approx -3\text{dB}$

Les diagrammes de Bode sont à mettre en regard de diagrammes de Fresnel.

Le filtre RC, avec la sortie sur le condensateur est un filtre passe-bas car pour les basses fréquences le module de  $\underline{H}_u$  tend vers l'unité (ce qui correspond à un gain de 0 dB). Pour les hautes fréquences, le module de  $\underline{H}_u$  tend à s'annuler (le gain tend vers  $-\infty$ ).



### Exercice

On considère un circuit série RL ( $R = 10 \Omega$ ,  $L = 10$  mH) auquel on applique une tension d'entrée  $u_e(t) = u(t)$ . La tension de sortie est aux bornes de la bobine :  $u_s(t) = u_L(t)$ .

Après avoir dessiné le circuit, on peut calculer la pulsation de coupure  $\omega_0$  qui correspond à des modules identiques pour les impédances de R et L.

On peut représenter les impédances et les vecteurs tournants au sein de diagrammes de Fresnel pour trois valeurs de pulsation ( $\omega = 0,5 \omega_0$  ;  $\omega = \omega_0$  ;  $\omega = 2 \omega_0$ ). On trouve ensuite les expressions de  $\underline{H}_u$ ,  $H_u$ ,  $G_u$  et  $\text{Arg}(\underline{H}_u)$  pour dessiner les diagrammes de Bode.

Echelle logarithmique :  $\overset{1}{|} \quad \overset{2}{|} \quad \overset{3}{|} \quad \overset{4}{|} \quad \overset{5}{|} \quad \overset{6}{|} \quad \overset{7}{|} \quad \overset{8}{|} \quad \overset{9}{|} \quad \overset{1}{|} \quad \overset{2}{|} \quad \overset{3}{|} \quad \overset{4}{|} \quad \overset{5}{|} \quad \overset{6}{|} \quad \overset{7}{|} \quad \overset{8}{|} \quad \overset{9}{|} \quad \overset{1}{|}$

**Partie Eo : Exercices sur les filtres**

- 1.) Représentez les graphiques de  $i(t)$ ,  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$  et  $u(t)$  de deux impédances  $\underline{Z}_1$  et  $\underline{Z}_2$  mises en série.  $i(t)$  est le courant commun et  $u(t)$  la tension aux bornes de l'ensemble. Dessinez, à coté des graphiques, le diagramme de Fresnel en  $t=0$  (et  $\theta_i=0$ ).
  - 1.1)  $u(t) = \hat{U}\sin(\omega t + \theta_u)$ ,  $\omega = 100 \text{ rad/s}$ ,  $\hat{U}=10\text{V}$ ,  $\underline{Z}_1 \leftrightarrow R_1 = 10 \Omega$ ,  $\underline{Z}_2 \leftrightarrow R_2 = 30 \Omega$
  - 1.2)  $u(t) = \hat{U}\sin(\omega t + \theta_u)$ ,  $\omega = 50 \text{ rad/s}$ ,  $\hat{U}=10\text{V}$ ,  $\underline{Z}_1 \leftrightarrow R_1 = 10 \Omega$ ,  $\underline{Z}_2 \leftrightarrow C_2 = 1\text{mF}$
  - 1.3)  $u(t) = \hat{U}\sin(\omega t + \theta_u)$ ,  $\omega = 500 \text{ rad/s}$ ,  $\hat{U}=20\text{V}$ ,  $\underline{Z}_1 \leftrightarrow R_1 = 2 \Omega$ ,  $\underline{Z}_2 \leftrightarrow L_2 = 1\text{mH}$
  - 1.4)  $u(t) = \hat{U}\sin(\omega t + \theta_u)$ ,  $\omega = 100 \text{ rad/s}$ ,  $\hat{U}=20\text{V}$ ,  $\underline{Z}_1 \leftrightarrow C_1 = 2\text{mF}$ ,  $\underline{Z}_2 \leftrightarrow C_2 = 1\text{mF}$
  
- 2.) Que vaut la fréquence de coupure d'un circuit RL si  $R = 10 \Omega$  et  $L = 1\text{mH}$  ?
  
- 3.) Trouvez C pour une fréquence de coupure de 1 kHz d'un circuit RC où  $R = 100 \Omega$ .
  
- 4.) Faites une étude complète d'un circuit, à savoir :
  - Dessinez le circuit.
  - Calculez la pulsation de coupure  $\omega_0$
  - Représentez les diagrammes de Fresnel pour  $\omega = 0,5 \omega_0$  ;  $\omega = \omega_0$  et  $\omega = 2 \omega_0$  .
  - Trouvez l'expression de la fonction de transfert  $\underline{H}_u$
  - Trouvez l'expression du module de  $\underline{H}_u$
  - Calculez le gain  $G_u$  pour  $\omega = 0,1 \omega_0$  ;  $\omega = 0,5 \omega_0$  ;  $\omega = \omega_0$  ;  $\omega = 2 \omega_0$  et  $\omega = 10 \omega_0$ .
  - Trouvez l'expression de l'argument de  $\underline{H}_u$
  - Calculez l'argument de  $\underline{H}_u$  pour  $\omega = 0,1 \omega_0$  ;  $\omega = 0,5 \omega_0$  ;  $\omega = \omega_0$  ;  $\omega = 2 \omega_0$  ;  $\omega = 10 \omega_0$ .
  - Représentez les diagrammes de Bode
  - Tentez de représenter l'allure de tous les signaux si  $f = 1000 \text{ Hz}$  et  $\hat{U}=10\text{V}$
  - 4.1) Nous avons un circuit avec un condensateur de  $100 \mu\text{F}$  en série avec une résistance de  $10 \Omega$ . Le signal de sortie se trouve aux bornes de la résistance.
  - 4.2) Nous avons un circuit avec une résistance de  $100 \Omega$  en série avec une inductance de  $1\text{mH}$ . Le signal de sortie se trouve aux bornes de l'inductance.

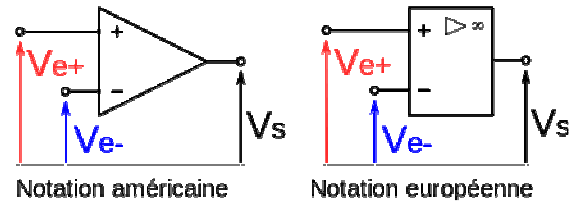
## Partie Eo : L'ampli opérationnel idéal et le montage suiveur

### L'ampli opérationnel idéal

Idéalement, l'ampli opérationnel va amplifier la différence de potentiel entre  $V_{e+}$  et  $V_{e-}$  par un facteur infini.

D'autre part, l'ampli opérationnel a une impédance d'entrée qui vaut idéalement l'infini.

Nous allons considérer ces conditions idéales de l'ampli opérationnel pour autant que le circuit le permette. En travaillant dans un mode "ampli" ou "filtre", on veillera à ce que la tension de sortie n'atteigne pas les valeurs limites fixées par les bornes d'alimentation. Avec ces modes, on verra apparaître une rétroaction sur l'entrée inverseuse ( $V_{e-}$  ou  $e^-$ ).



### L'utilisation d'un ampli opérationnel (AOP)

Un ampli opérationnel est un composant dont on utilise au minimum 5 contacts :

- gnd et  $V^+$  pour une alimentation asymétrique (ou  $V^+$  et  $V^-$  pour une alimentation symétrique)
- L'entrée inverseuse ( $V_{e-}$  ou  $e^-$ ), L'entrée non-inverseuse ( $V_{e+}$  ou  $e^+$ ), la sortie  $V_s$

En mode "ampli" ou "filtre", on aura une boucle de contre-réaction entre la sortie et l'entrée inverseuse. On pourra considérer que les potentiels  $e^+$  et  $e^-$  sont égaux.

Certains schémas de principe ne font pas apparaître les broches d'alimentation.

Il est courant de voir apparaître l'entrée inverseuse au dessus pour la lisibilité du schéma.

### Exemple d'application de l'ampli opérationnel : Le montage suiveur

Dans un 1<sup>er</sup> temps, le montage suiveur peut paraître interpellant car il s'agit d'un montage dont l'amplification en tension vaut 1. Autrement dit le signal de sortie  $u_s(t)$  vaut simplement la tension d'entrée  $u_e(t)$ .

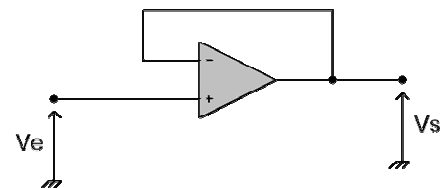
On peut se demander légitimement "pourquoi ne pas remplacer ce montage par un fil ?"

La justification est que le montage suiveur joue le rôle d'étage tampon, les explications sont basées sur les notions d'impédances d'entrée et de sortie.

Principe du montage suiveur :

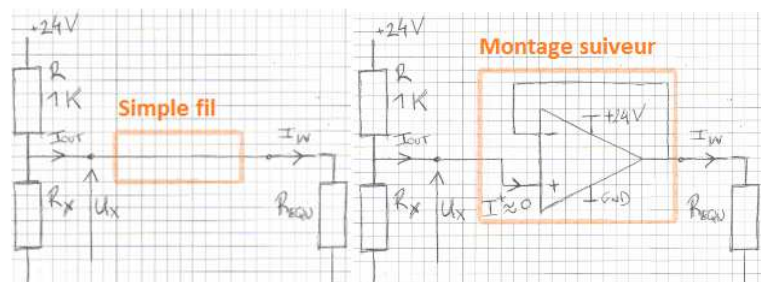
Comme le montre le schéma, on a bien une contre-réaction entre la sortie et l'entrée inverseuse.

En considérant que les potentiels  $e^+$  et  $e^-$  sont égaux, nous avons bien  $u_s(t) = u_e(t)$  (ou  $V_s = V_e$ ).



### Exemple numérique

Comparons l'impact du circuit en supposant  $R_x = 3k\Omega$  et  $R_{EQU} = 10k\Omega$ . Avec un simple fil,  $U_x$  qui valait 18V à vide se voit modifié par le circuit. Avec le montage suiveur,  $U_x$  n'est pas modifié grâce à l'impédance d'entrée infinie de l'AOP.



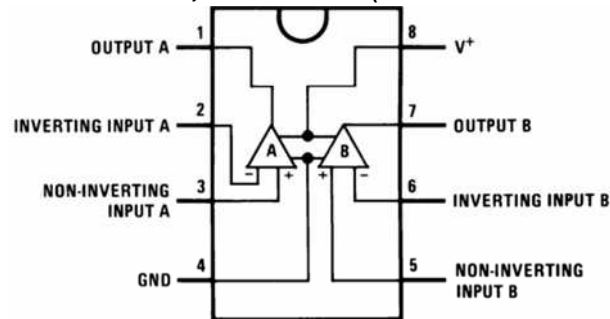
## Partie Eo : Manipulation sur le montage suiveur

### Brochage de l'ampli opérationnel LM358N, boîtier PDIP (Plastic Dual Inline Package)

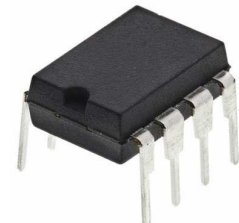
Le brochage est en vue du dessus (Top view).

Ce composant contient deux AOP intégrés dans un seul boîtier.

Il est conçu pour accepter une alimentation asymétrique 0 / 24V.



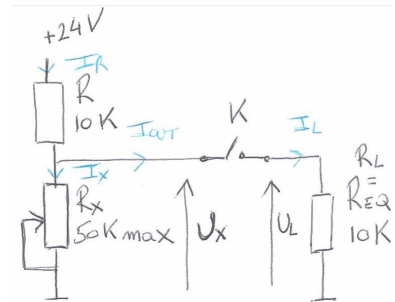
Boîtier type DIP, "Through Hole"



### Mesures sans le montage suiveur

Câblez ce montage pour voir l'influence de l'état de K sur  $U_x$ .

- Mesurez les valeurs de R et  $R_{EQ}$ .
- Mesurez la tension d'alimentation.
- Réglez  $R_x$  pour avoir environ 10 K.
- Mesurez  $U_x$  (K ouvert) puis  $U_L$  (K fermé).
- Tracez un graph de  $U_L$  (K fermé) en fonction de  $U_x$  (K ouvert) pour différents réglages de  $R_x$ .



On imagine que  $R_x$  simule une résistance qui varie suivant une grandeur physique.

Le branche R /  $R_x$  fournit alors une tension  $U_x$  dépendant d'une grandeur physique.

D'autre part, on imagine que la charge  $R_L$  correspond à la résistance équivalente du circuit qui exploite la tension reçue (par exemple un convertisseur analogique/numérique).

### Mesures avec le montage suiveur

Intercalez votre AOP monté en suiveur entre l'interrupteur K et la résistance  $R_L$ .

- Dessinez le schéma du montage complet.
- Observez si la valeur de  $U_x$  se modifie lorsqu'on ferme l'interrupteur. Que remarque-t-on ?
- Tracez un graph de  $U_L$  (K fermé) en fonction de  $U_x$  (K ouvert) pour différents réglages de  $R_x$ .
- Comparez votre graph à celui obtenu sans le montage suiveur. Comparez les résultats.
- Tentez de régler  $R_x$  à 0 pour observer la plus faible valeur de  $U_L$  (K fermé).
- Interchangez R et  $R_x$  et réglez  $R_x$  à 0 pour observer la plus grande valeur de  $U_L$  (K fermé).
- Disposez-vous d'un AOP rail-to-rail, c'est à dire dont la sortie peut aller aux limites des niveaux de tension de l'alimentation ?

### Résistance d'entrée et résistance de sortie

Reprenez le montage sans le montage suiveur et tentez de voir l'influence de la valeur de  $R_L$ .

Prenez deux autres valeurs de  $R_L$  (1K et 100K) et voyez si ça a une influence sur la relation  $U_L$  (K fermé) et  $U_x$  (K ouvert). Sachant que  $R_L$  correspond à la résistance d'entrée du montage suivant : *Que souhaite-t-on idéalement comme résistance d'entrée d'un circuit pour que celui-ci influence le moins possible le signal reçu par le montage précédent ?*

Il y a aussi la notion de résistance de sortie que l'on souhaite la plus faible possible.

## Partie Eo : Le montage non-inverseur

### Principe du montage non-inverseur

Pour faire fonctionner l'AOP en mode "ampli", on doit prévoir une boucle de contre-réaction entre la sortie et l'entrée inverseuse. Contrairement au montage suiveur où l'on connecte directement la sortie de l'AOP sur l'entrée inverseuse, ici on va réinjecter sur  $e^-$  une fraction de la tension de sortie. On crée alors un diviseur de tension dont le point milieu va sur  $e^-$ . Le signal d'entrée, tout comme pour le montage suiveur, sera simplement connecté à  $e^+$ .

Avec la rétroaction, on peut dire que  $e^+ = e^-$   
 $u_e$  se trouve alors aux bornes de  $R_1$

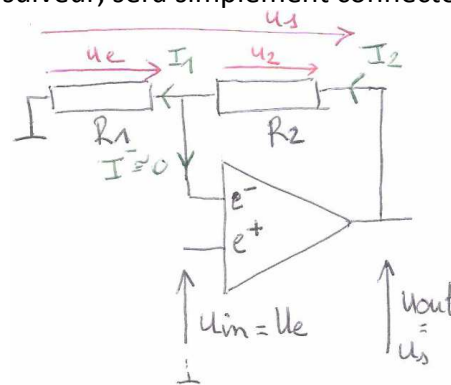
Comme la résistance d'entrée de l'AOP  $\approx \infty$ ,  
 On peut considérer  $I^- = 0 \rightarrow I_1 = I_2 = I$

Avec la loi des mailles sur  $u_s$ , on trouve :

$$u_s = u_e + u_2 = I \cdot R_1 + I \cdot R_2$$

Avec la loi d'Ohm sur  $R_1$  :  $I = u_e / R_1$

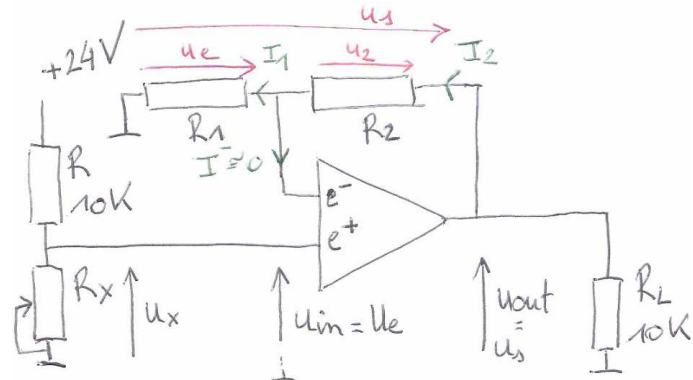
En remplaçant  $I$ , on trouve le facteur d'amplification  $A_V = u_s / u_e = 1 + R_2 / R_1$



### Câblage du montage non-inverseur (avec l'AOP LM358N)

Commencez par câbler le montage ci-dessous avec une résistance variable  $R_x$  max de 50K,  $R_1 = 1K$  et  $R_2 = 1K$ . Comme pour le montage suiveur, on imagine que  $R_x$  simule une résistance qui varie suivant une grandeur physique. D'autre part, on imagine que la charge  $R_L$  correspond à la résistance équivalente du circuit qui exploite la tension reçue.

- 1.) Réglez  $R_x$  sur environ 2K
- 2.) Mesurez  $u_e$  et  $u_s$
- 3.) Calculez le  $A_V$  sur base des mesures
- 4.) Refaites les points 2.) et 3.) pour  $R_2 = 100 \Omega$ ,  $R_2 = 10K$  puis  $R_2 = 47K$   
 Qu'observez-vous ?
- 5.) Refaites les points 2.), 3.) et 4.) pour  $R_x = 100 \Omega$ ,  $R_x = 10K$   
 Qu'observez-vous ?



### Quelques réflexions

- Est-il possible d'avoir une atténuation du signal d'entrée ( $A_V < 1$ ) ?
- La valeur de  $R_L$  a-t-elle une influence sur le  $A_V$  ? Pourquoi ?
- Si on place un signal  $u_e$  de type sinus, quelle sera l'allure de  $u_s$  ?
- Si on place un signal  $u_e$  de moyenne nulle et d'amplitude 1V, quel est le facteur d'amplification maximum ? Pourquoi ?
- La résistance de sortie liée au signal  $u_x$  a-t-elle une influence sur le  $A_V$  ? Pourquoi ?
- Imaginons que l'on veuille un  $A_V$  de 11, est il mieux de choisir A. ou B. ?
  - A.  $R_1 = 1 \Omega$  et  $R_2 = 10 \Omega$
  - B.  $R_1 = 1 k\Omega$  et  $R_2 = 10 k\Omega$

## Partie Eo : Alimentation symétrique : Inverseur et sommateur-inverseur

### Montage inverseur

Le schéma du montage inverseur ressemble fort au schéma du montage non-inverseur, il suffit d'inverser la position du signal d'entrée et de la masse.

Si on calcule le facteur d'amplification idéal du circuit, on trouve  $A_V = -R_2/R_1$ . Ce qui signifie que si on fournit un signal d'entrée  $u_e$  positif, on trouve un signal de sortie  $u_s$  négatif ; celui-ci sera borné à 0V dans le cas d'une alimentation asymétrique telle que 0/24V.

On comprend que pour permettre à la sortie d'être l'image de la tension  $u_e$  amplifiée, on doit prévoir une alimentation symétrique.

Pour calculer  $A_V$ , on considère la résistance d'entrée de l'AOP comme infinie  $\rightarrow (i^- = 0)$  et le fait que  $e^+ = e^-$ .

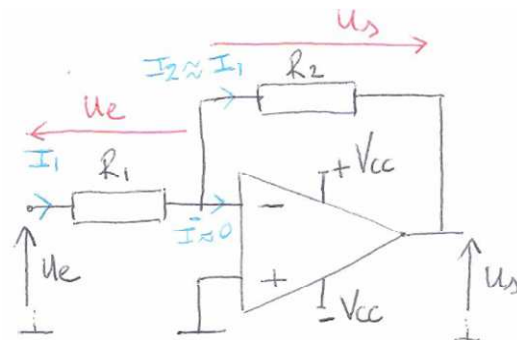
On dit alors que  $e^-$  est une masse virtuelle.

Le schéma du circuit donne :

$$I_1 = I_2 = I, \quad u_e = u_{R1} = R_1 * I_1, \quad u_{R2} = -u_s = R_2 * I_2$$

$$\rightarrow I = I_1 = u_e / R_1 = I_2 = -u_s / R_2$$

$$\rightarrow A_V = u_s / u_e = -R_2 / R_1$$



Ce montage utilise une alimentation symétrique mais autorise un signal d'entrée positif comme négatif. D'autre part, la tension de sortie peut être le résultat d'une amplification comme d'une atténuation ; cependant elle est inversée par rapport à l'entrée.

Il est à remarquer que ce montage extrait du courant du montage précédent, il a donc une résistance d'entrée non idéale et modifie la tension qu'aurait  $u_e$  à vide !

### Montage sommateur-inverseur

En partant du montage inverseur, on peut sommer le signal  $u_2$  à  $u_1$  par l'intermédiaire de la résistance  $R_2$  comme indiqué sur le schéma ci-dessous. Il est d'ailleurs possible de poursuivre la somme en ajoutant un signal  $u_3$  par l'intermédiaire d'une résistance  $R_3, \dots$

Le principe repose sur le fait qu'il apparaît à l'entrée  $e^-$  une masse virtuelle (M.V.) qui permet d'obtenir l'image des différentes tensions  $u_1, u_2, \dots$  sous la forme des courants  $I_1, I_2, \dots$

Ces courants sont alors additionnés pour former le courant  $I$  (loi des noeuds).

Pour les calculs, on considère la résistance d'entrée de l'AOP comme infinie  $\rightarrow (i^- = 0)$  et le fait que  $e^+ = e^-$ .

On dit alors que  $e^-$  est une masse virtuelle.

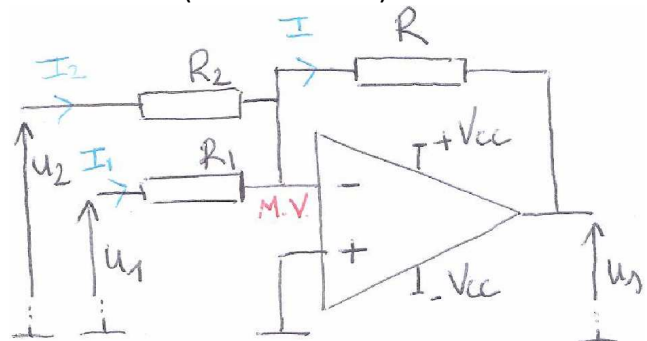
Le schéma du circuit donne :

$$I = I_1 + I_2, \quad u_1 = R_1 * I_1, \quad u_2 = R_2 * I_2, \quad u_s = -R * I$$

$$\rightarrow I = I_1 + I_2 = (u_1 / R_1) + (u_2 / R_2) = -u_s / R$$

Si on suppose  $R_1 = R_2 = R^*$ , on trouve :

$$u_s = - (R / R^*) * (u_1 + u_2)$$



Ce montage extrait du courant aux circuits précédents et accepte des tensions négatives.

Il existe une version du sommateur pour le montage non-inverseur ; le principe n'est plus basé sur une addition de courant mais sur l'apparition d'une tension moyenne (proche de l'expression de la somme) sur l'entrée non-inverseuse.

## Partie Eo : Alimentation asymétrique d'un montage inverseur

### Passage d'une alimentation symétrique vers une alimentation asymétrique

Lorsqu'on parle de potentiel électrique ou de l'allure d'un signal, on fait généralement référence à une différence de potentiel entre un point et la masse ; la masse correspond à ce que nous considérons comme notre référence 0V.

Lorsqu'on applique 24V entre les pattes d'alimentation d'un AOP, il peut fonctionner de la même façon que l'alimentation soit asymétrique 0/24V ou symétrique -12V/+12V ; ce qui importe pour le composant c'est la différence de potentiel.

En partant du montage inverseur à alimentation symétrique et en décidant que  $-V_{CC}$  serait notre référence 0V, ça revient à ajouter  $V_{CC} = V_{DD}/2$  à tous les potentiels comme ci-dessous.

Les signaux d'entrée et de sortie ( $u_e'$  et  $u_s$ ) ont maintenant une composante continue supplémentaire ( $V_{DD}/2$ ). L'idée est d'amplifier (ou atténuer) la partie du signal utile  $u_e$ .

L'entrée inverseuse peut être considéré comme un  $V_{DD}/2$  virtuel.

Le schéma du circuit donne :

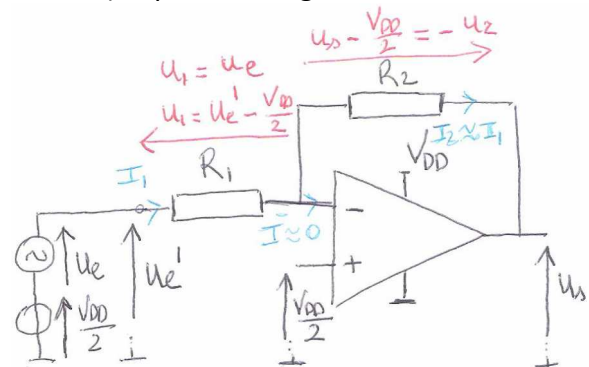
$$I_1 = I_2 = I, \quad u_e = u_1 = R_1 * I_1, \quad u_2 = R_2 * I_2$$

Si on appelle la partie utile de  $u_s$  :  $u_s^* = u_s - V_{DD}/2$  :

$$\rightarrow I = I_1 = u_e / R_1 = I_2 = u_2 / R_2 = -u_s^* / R_2$$

$$\rightarrow A_V = A_V \text{ utile} = u_s^* / u_e = -R_2 / R_1$$

$$\rightarrow u_s = u_s^* + V_{DD}/2 = -(R_2 / R_1) * u_e + V_{DD}/2 \\ = V_{DD}/2 - (R_2 / R_1) * (u_e' - V_{DD}/2)$$

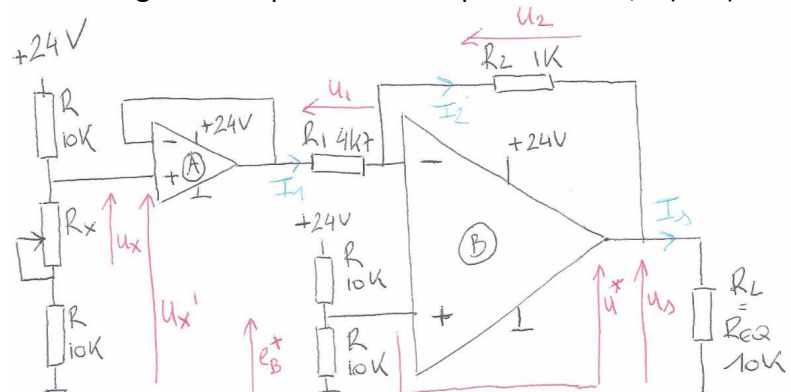


### Câblage d'un montage inverseur à alimentation asymétrique (avec l'AOP LM358N)

Le schéma inventé ci-dessous illustre une mise en oeuvre d'un montage inverseur sans recourir à une alimentation continue supplémentaire pour  $V_{DD}/2$ . On déroge un peu à l'idée d'ajouter un offset de  $V_{DD}/2$  au signal utile mais le câblage est tel que  $u_x'$  reste supérieur à  $V_{DD}/2$  (12V).

Normalement l'idée est d'avoir la partie utile ( $u^*$ ) du signal de sortie qui soit la partie utile ( $u_x$ ) du signal d'entrée multipliée par  $-(R_2/R_1)$ . On verra qu'on n'a pas tout à fait ça ; Ce montage est-il cependant exploitable ?

Avec  $R_x$  max = 50 K, câblez et mesurez  $R_1[\Omega]$ ,  $R_2[\Omega]$ , la tension d'alimentation  $V_{DD}$  [V] et  $e_B^+$  [V].



Réalisez un tableau pour différentes valeurs de  $R_x$  avec les mesures suivantes :

$R_x[\Omega]$ ,  $u_x[V]$ ,  $u_x'[V]$ , la sortie du montage suiveur  $u_{sA}[V]$ ,  $u^*[V]$  et  $u_s[V]$

Tentez de régler  $R_x$  pour des valeurs proches de : 0  $\Omega$ , 5K, 10K, 15K, 20K et 50K.

Est-ce que le montage suiveur joue son rôle (c'est-à-dire que  $u_x' = u_{sA}$ ) ?

Est-ce que le montage inverseur vérifie bien que  $u^* = -(R_2/R_1) * (u_{sA} - V_{DD}/2)$  ?

Commentez le montage et expliquez si on peut retrouver  $R_x$  et/ou  $u_x$  à partir de  $u_s$ .

## Partie Eo : Filtres à amplificateur opérationnel

### Dérivation et intégration (en fonction du temps)

Si on garde à l'esprit la décomposition de Fourier d'un signal périodique  $u(t)$ , on peut comprendre facilement ce que deviendrait ce signal en le dérivant ou l'intégrant.

On sait que la dérivée d'une somme correspond à la somme des dérivées et que l'intégrale d'une somme correspond à la somme des intégrales. Dans ce cas, on peut analyser l'impact de la dérivation d'un signal (ou de l'intégration) en examinant séparément les différentes composantes de ce signal :

- Pour la composante continue  $U_{DC}$ , sa dérivée vaut 0 et son intégrale vaut  $U_{DC} * t$ .  
Si on intègre sur la période  $T$ , on trouve  $U_{DC} * T = T * U_{moyen}$
- Pour une composante sinusoïdale de type  $u_i(t) = U_{MAX\_i} * \sin(\omega_i t + \varphi_i)$ ,  
Sa dérivée donne  $du_i/dt = U_{MAX\_i} * \cos(\omega_i t + \varphi_i) * \omega_i$   
Son intégrale donne  $\int u_i dt = U_{MAX\_i} * \cos(\omega_i t + \varphi_i) * (-1/\omega_i)$

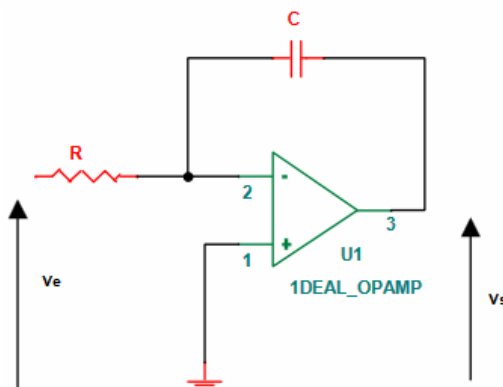
On peut montrer que pour un vecteur tournant à pulsation  $\omega_i$  (qui correspond à un sinus), le fait de le dériver revient à multiplier par  $(j\omega_i)$  et le fait d'intégrer revient à diviser par  $(j\omega_i)$ .

Pour une dérivation, l'amplitude est multipliée par  $\omega_i$  et la phase est augmentée de  $\pi/2$ .

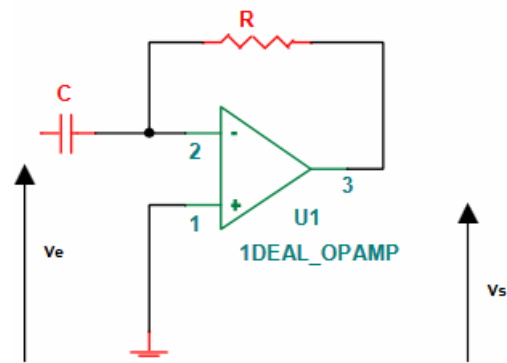
Pour une intégration, l'amplitude est divisée par  $\omega_i$  et la phase est diminuée de  $\pi/2$ .

On dit aussi qu'un dérivateur est un filtre passe-haut et qu'un intégrateur est un passe-bas.

### Montage intégrateur à AOP



### Montage dérivateur à AOP



[http://easytp.cnam.fr/leruyet/Cours\\_ELE004/cours\\_ELE004\\_AOP.pdf](http://easytp.cnam.fr/leruyet/Cours_ELE004/cours_ELE004_AOP.pdf)

Pour justifier qu'il s'agit bien là de montages intégrateur et dérivateur, nous pouvons rechercher l'expression complexe de leurs fonctions de transfert en exploitant la définition des impédances complexes. Une autre façon est d'exploiter la formule "  $i = C du_c/dt$  ".

Utilisons les impédances complexes pour trouver les fonctions de transfert en considérant le courant  $I$  entrant et  $e^-$  comme une masse virtuelle :

$$\underline{V}_e = R * I, \quad \underline{V}_s = -Z_C * I \rightarrow \underline{H}_u = \underline{V}_s / \underline{V}_e = -Z_C / R$$

$$\rightarrow \underline{H}_u = - (1/j\omega C) / R = - (1/j\omega CR) = A(j\omega)$$

$$\rightarrow \boxed{A(j\omega) = -\frac{1}{RCj\omega} = -\frac{1}{j\frac{\omega}{\omega_0}}} \quad \text{où } \omega_0 = 1/RC$$

À part le signe moins et le facteur  $\omega_0$ , on voit bien qu'on divise par  $(j\omega)$  → intégrateur.

$$\underline{V}_e = Z_C * I, \quad \underline{V}_s = -R * I \rightarrow \underline{H}_u = \underline{V}_s / \underline{V}_e = -R / Z_C$$

$$\rightarrow \underline{H}_u = -R / (1/j\omega C) = -j\omega CR = A(j\omega)$$

$$\rightarrow \boxed{A(j\omega) = -RCj\omega = -j\frac{\omega}{\omega_0}} \quad \text{où } \omega_0 = 1/RC$$

À part le signe moins et le terme  $\omega_0$ , on voit bien qu'on multiplie par  $(j\omega)$  → dérivateur.

**Partie Eo : Exercices sur les AOP**

- 1.) Dessinez un schéma d'un montage à AOP qui amplifie la tension d'entrée par 2.
- 2.) Dessinez un schéma où une tension de 24V est appliquée à un diviseur de tension composé de deux résistances équivalentes de 10K.
  - 2.1) Quelle est la valeur de la tension à vide aux bornes de la résistance inférieure ?
  - 2.2) Que devient cette tension si on place une charge de 100K en parallèle ?
  - 2.3) Que devient cette tension si on place une charge de 1K en parallèle ?
  - 2.4) Quelle est la valeur idéale pour la résistance d'entrée d'un circuit ?
  - 2.5) Quelle est la valeur idéale pour la résistance de sortie d'un circuit ?
- 3.) Dessinez un schéma d'un montage à AOP qui atténue l'amplitude du signal d'entrée par 10.
- 4.) Dessinez un schéma d'un montage type intégrateur idéal à AOP.
  - 4.1) Si  $R = 1K$ , calculez  $C$  pour avoir une fréquence de coupure ( $f_c = f_0$ ) à 500Hz.
  - 4.2) Dessinez les diagrammes de Fresnel pour  $f = 0,5 f_0$  ;  $f = f_0$  et  $f = 2 f_0$ .
  - 4.3) Dessinez les diagrammes de Bode.
  - 4.4.) Quel type de filtre avons-nous ? Passe-haut, Passe-bas, Passe-bande ?
- 5.) Dessinez un schéma d'un montage type dérivateur idéal à AOP.
  - 4.1) Si  $C = 1\mu F$ , calculez  $R$  pour avoir une fréquence de coupure ( $f_c = f_0$ ) à 1000Hz.
  - 4.2) Dessinez les diagrammes de Fresnel pour  $f = 0,5 f_0$  ;  $f = f_0$  et  $f = 2 f_0$ .
  - 4.3) Dessinez les diagrammes de Bode.
  - 4.4.) Quel type de filtre avons-nous ? Passe-haut, Passe-bas, Passe-bande ?
- 6.) À quoi sert un montage suiveur?

**SITUATION D'APPRENTISSAGE 11**

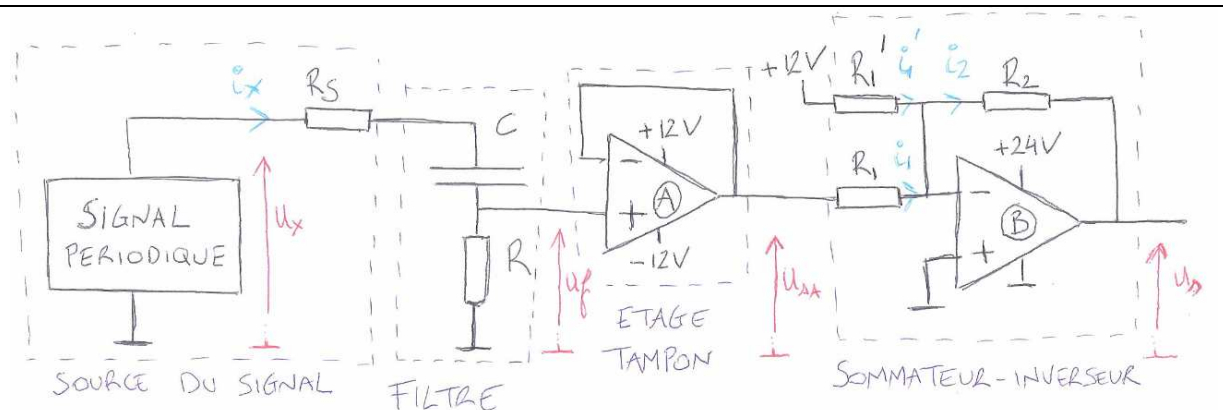
Fiche de description

**Etude de montages à amplificateurs opérationnels**
**Description**

Dans le cadre d'une étude, on souhaite étudier la fonctionnalité d'un montage à amplificateurs opérationnels ainsi que l'évolution temporelle et fréquentielle de signaux.

**Cahier des charges**

- 1.) Retrouver l'expression approchée de la fonction de transfert complexe du filtre en négligeant  $R_S$ . Cherchez donc  $H_U$  (approché) =  $\underline{U}_f / \underline{U}_x$  où  $R_S$  est remplacé par un fil.
- 2.) Tenez compte du fait que la source du signal possède une résistance de sortie  $R_S$  et trouvez l'expression de la fonction de transfert corrigée du filtre.  
Une façon de faire en deux temps :
  - Imaginez qu'on inclut  $R_S$  à la résistance  $R$  pour étudier  $H_U^* = \underline{U}_f^* / \underline{U}_x$  où :  $R$  est remplacé par  $R_{EQ} = R + R_S$  et  $R_S$  est court-circuité  $\rightarrow i_x$  est inchangé  $\underline{U}_f$  devient  $\underline{U}_f^*$  qui correspond à  $\underline{U}_R + \underline{U}_{R_S}$
  - Tenez compte que comme  $R_S$  et  $R$  sont parcourus par le même courant,  $\underline{U}_f = \underline{U}_f^* * R / (R + R_S)$
- 3.) Calculez la fréquence de coupure  $\omega_0$  et dessinez 3 diagrammes de Fresnel pour  $\omega = 0,5 \omega_0$ ;  $\omega = \omega_0$  et  $\omega = 2 \omega_0$ .
- 4.) Dessinez les diagrammes de Bode du filtre  $R_S$  comprise (donc lié à  $H_U = \underline{U}_f / \underline{U}_x$ ).
- 5.) Dessinez les graphiques de  $u_x(t)$  et de  $u_{sA}(t)$  pour  $u_x(t) = u_{X\_TEST} = e(t)$ .
- 6.) Trouvez l'expression de  $u_s(t)$  en fonction de  $u_{sA}(t)$ .
- 7.) En considérant  $u_x(t) = u_{X\_TEST} = e(t)$ , donnez la représentation spectrale de  $u_x(t)$ ,  $u_{sA}(t)$  et  $u_s(t)$ .

**Schéma**

**Données**

$R_S = 100 \Omega$ ,  $R = 820 \Omega$ ,  $C = 1 \mu F$ ,  $R_1 = R_1' = R_2 = 10\,000 \Omega$

Soit  $u_{X\_TEST} = e(t) = 5 + 4 \sin(2\pi \cdot 50 \cdot t) + 2 \sin(2\pi \cdot 500 \cdot t)$  [V]

**SITUATION D'APPRENTISSAGE 11** :

**Evaluation de l'UAA2**

Traitement du signal

Date	Classe	Prénom + nom

En vous basant sur la fiche de description de la situation d'apprentissage 11, rédigez ci-dessous un rapport concernant les points 1 à 4.

**1.) et 2.)**

**3.) et 4.)**



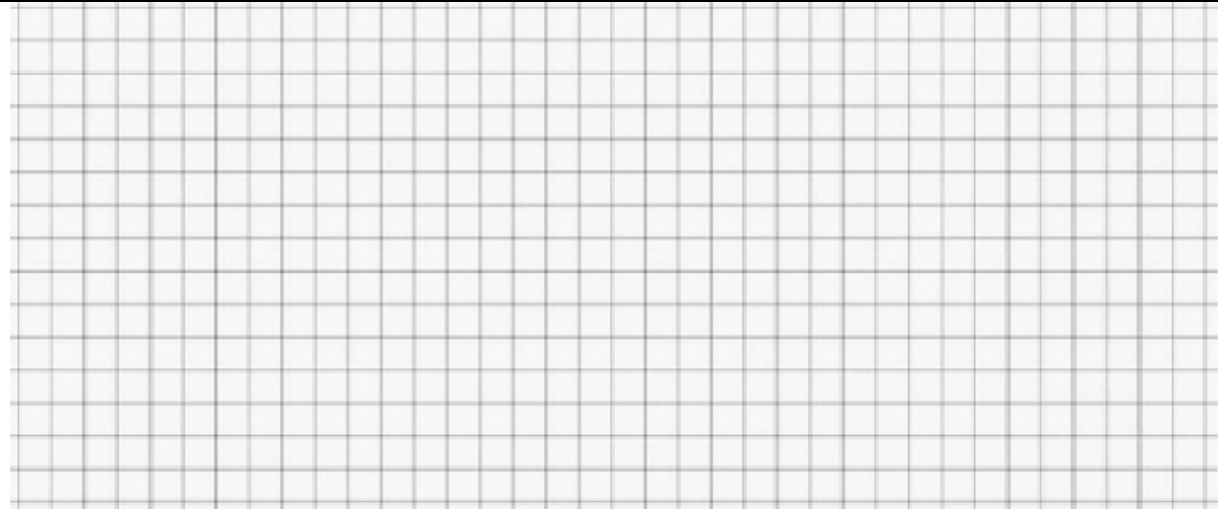
1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

**SITUATION D'APPRENTISSAGE 11** :**Evaluation de l'UAA2**

Traitement du signal

Date	Classe	Prénom + nom

En vous basant sur la fiche de description de la situation d'apprentissage 11, rédigez ci-dessous un rapport concernant les points 5 à 7.



**Base de planification jusqu'à la situation d'apprentissage 12**

SEM 1	Le transformateur	Le redressement et le filtrage d'une alimentation DC	La régulation linéaire d'une alimentation DC
SEM2	Le régulateur à découpage	<b>Manip / exo</b> Exercices sur l'alimentation DC	Les accumulateurs
SEM3	Situation d'apprentissage 12	Situation d'apprentissage 12	

**Planification prévisionnelle jusqu'à la situation d'apprentissage 12**

Semaine	Jour	Jour	Jour

Compléter le planning prévisionnel en classe

**Partie Eo : Le transformateur**

**Champ électrique et champ magnétique**

Ces champs caractérisent chaque point de l'espace et traduisent les forces qui agiraient sur une charge si on la plaçait à un endroit précis dans l'espace.

En plaçant une charge  $q$  dans un champ électrique  $E$  [V/m], il apparaît une force électrique. Avec une charge en mouvement ( $q.v$ ) dans un champ d'induction magnétique  $B$  [T ou Tesla], il apparaît une force magnétique. Les champs, les forces et la vitesse sont des vecteurs.

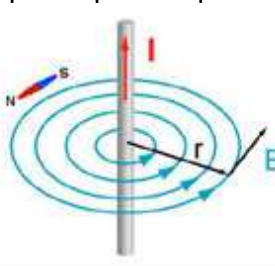
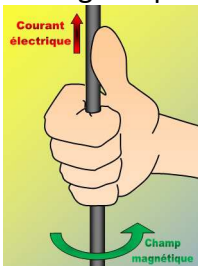
Force électrique :  $F = q \cdot E$       Force magnétique :  $F = q \cdot v \wedge B$

Un champ électrique est créé par l'existence d'au moins une charge électrique. Un champ magnétique est créé par des aimants et/ou des charges électriques en mouvement.

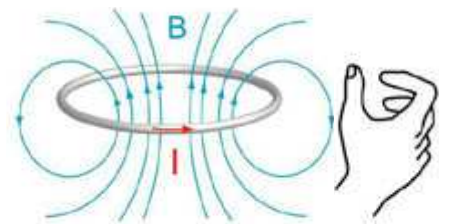
**Une spire parcourue par un courant**

Lorsqu'un courant traverse un conducteur, il apparaît un champ magnétique.

Si la forme du conducteur est une spire, il apparaît à l'intérieur de la spire un champ magnétique qui est produit par les "morceaux de conducteurs" parcourus par le courant.



La règle de la main droite donne le sens de translation à partir du sens de rotation. Comme pour un tire-bouchon, le pouce monte si on tourne dans le sens des doigts. Cette règle fonctionne pour le sens de  $I$  (à gauche) ou le sens de  $B$  au sein d'une spire (à droite).



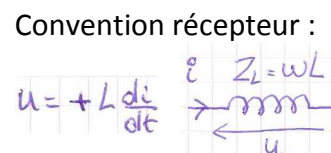
**Le solénoïde (la bobine) et son aimantation.**

En enroulant un conducteur sur un ensemble de spires, on obtient une bobine  $L$ . Si on applique une tension  $u$  à ses bornes, il apparaît un  $di/dt$  (variation de courant) tel que  $u = +L \cdot di/dt$ . On utilisera la convention récepteur pour le signe du courant  $i$  en rapport avec la tension  $u$ .

Convention récepteur :

$$u = +L \frac{di}{dt}$$

$\mathcal{E} = Z_L = \omega L$



En imaginant qu'on commence avec un courant nul,  $i(t=0) = 0$ , une tension continue aura pour effet d'établir le courant progressivement (et même linéairement) dans la bobine.

Comme pour une spire parcourue par un courant, le champ magnétique au sein du solénoïde sera lié à la valeur du courant (la règle de la main droite nous indique le sens).

Si on imagine que la tension aux bornes de la bobine provient d'un générateur de tension, le fait de voir s'installer un courant entrant dans la bobine implique une puissance électrique fournie par le générateur. Comme la bobine idéale utilise un conducteur parfait, on ne peut pas faire correspondre l'énergie fournie par le générateur à des pertes par effet Joule. L'énergie reçue par la bobine y sera stockée sous la forme d'un champ magnétique ou d'une aimantation.

**Le transformateur monophasé idéal**

Ce transformateur contient un noyau ferromagnétique autour duquel on trouve un enroulement primaire et un enroulement secondaire. Leurs nombres de spires respectifs sont notés  $N_p$  et  $N_s$ .

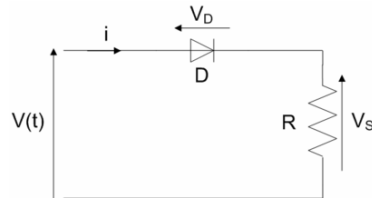
Le rapport de transformation  $m = N_s/N_p$  définit également le rapport des tensions  $U_s/U_p$ .

Comme la puissance fournie à l'enroulement primaire se retrouve communiquée à la charge connectée au secondaire, on trouve que  $m = I_p/I_s$ .

## Partie Eo : Le redressement et le filtrage d'une alimentation DC

### Redressement simple alternance pour une charge purement résistive

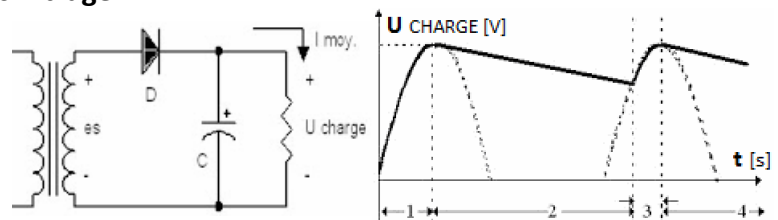
Le montage simple alternance contient simplement une diode entre le signal alternatif et la charge. La charge aura toujours une tension positive à ses bornes.



Lorsque la diode est bloquée ( $V(t) < V_{D\_SEUIL}$ ),  $V_S \approx 0$ .  
Autrement,  $V_S \approx V(t) - V_{D\_SEUIL}$   
La diode doit pouvoir supporter  $V(t)_{MAX}$  en inverse.

### Redressement simple alternance avec filtrage

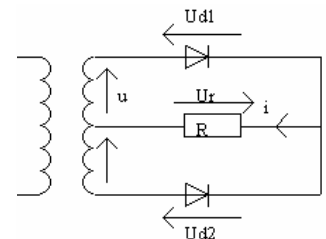
En ajoutant un condensateur en parallèle sur la charge, la tension de sortie est grossièrement stabilisée. Avec C suffisant, la décharge au travers de la charge est assez lente.



<http://schemas-electronique.blogspot.com>

### Redressement utilisant un transformateur à point milieu

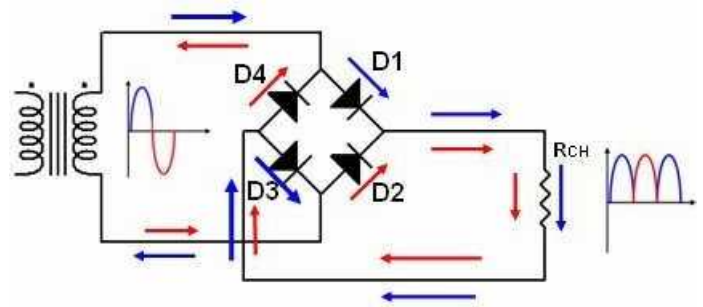
Si on possède un transformateur dont le bobinage secondaire a un point milieu, on peut mettre ce point milieu à la masse et obtenir un signal type "redressé double alternance". Chaque "demi-secondaire" se charge d'une alternance comme pour un redressement simple alternance. Le signal aux bornes de la charge contient chaque alternance redressée. Il est intéressant de dessiner un chronodiagramme de tous les signaux.



### Redressement et filtrage utilisant un pont diodes

En plaçant correctement en pont diode entre le secondaire du transformateur et la charge, on peut remarquer que celle-ci se voit toujours parcourue par un courant circulant dans le même sens.

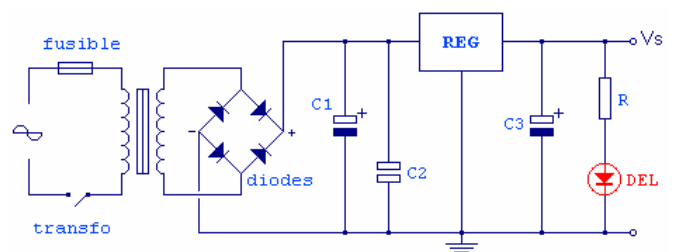
Pour l'alternance positive du secondaire, seules D1 et D3 sont passantes. Pour l'alternance négatives, ce sont D2 et D4.



<https://sites.google.com/site/thierrybiaye2/home/01-redresseur-simple-et-double-alternance>

### Exemple simple d'une alimentation stabilisée

La maille contenant le bobinage primaire contient un fusible et un interrupteur. Le pont diode redresse le signal.  $C_1$  filtre le signal et  $C_2$  pallie le défaut technologique de  $C_1$ . Le régulateur fournit une tension stabilisée qui est découplée par  $C_3$ . La LED indique la présence d'une tension  $V_S$ .

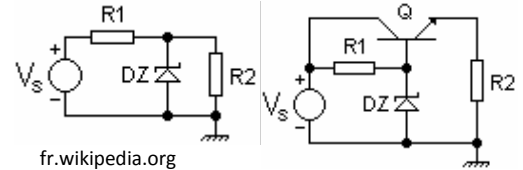


## Partie Eo : La régulation linéaire d'une alimentation DC

Un régulateur de tension permet de fournir une différence de potentiel stabilisée entre sa sortie et sa patte commune. On a alors une boucle fermée permettant de contrôler une grandeur physique. On distingue les régulateurs linéaires et les régulateurs à découpage.

### Deux principes de régulation en boucle ouverte

La charge est symbolisée par  $R_2$ . Le 1<sup>er</sup> montage est pour des faibles courant, le 2<sup>ème</sup> pour des courants plus élevés. La tension inverse d'une diode zéner est une bonne référence de tension mais varie un peu avec le courant.



### Quelques spécificités de la famille LM78XX

La famille LM78XX, très connue et encore souvent utilisée, propose des régulateurs pour différentes tensions. La valeur de la tension stabilisée est indiquée à la place du XX. On trouve par exemple les tensions 5V, 9V et 24V fournies par les régulateurs respectifs LM7805, LM7809 et LM7824.

LM7805, caractéristiques :

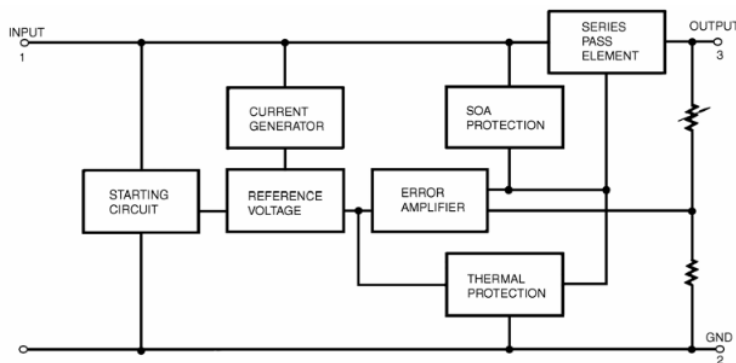
Quiescent Current : 5 à 8 mA

Dropout voltage : 2V

$U_{IN} = 35V$  max

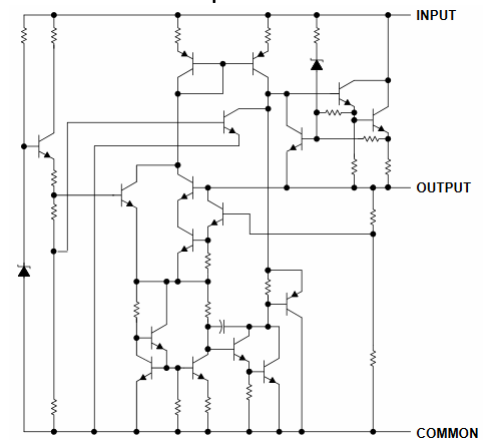
Output current : 1,5A max

#### Schéma bloc interne



Les schémas internes montrent une boucle fermée, une gestion de la température et l'utilisation d'une Zéner.

#### Schéma électrique interne



### La puissance dissipée dans un régulateur linéaire en pratique

En négligeant le courant de repos du régulateur, on peut considérer que  $I_{IN} \approx I_{OUT}$ . La puissance fournie par ce qui précède le régulateur vaut alors  $U_{IN} * I_{IN}$  alors que la puissance utilisée par la charge vaut  $U_{OUT} * I_{OUT}$ . La puissance (non utile) dissipée au sein du régulateur vaut alors  $I_{OUT} * (U_{IN} - U_{OUT})$ . La perte est proportionnelle au DROP ( $U_{IN} - U_{OUT}$ ).



### Comment améliorer le rendement de notre alimentation stabilisée ?

Avec un régulateur linéaire, pour produire une tension stabilisée  $U_{OUT}$ , il est préférable de limiter tant que possible la tension  $U_{IN}$ . En effet, le rendement ( $\eta = P_{UTILE} / P_{ABSORBEE}$ ) de l'alimentation stabilisée peut être considérée comme le rapport  $U_{OUT} / U_{IN}$ . Cependant, il existe une limite à la valeur de  $U_{IN}$  liée au fait que le régulateur a besoin d'un DROP ( $U_{IN} - U_{OUT}$ ) minimum pour fonctionner. On parle de moins d'un volt (pour un régulateur LOW-DROP) à quelques volts.

## Partie Eo : Le régulateur à découpage

Le mauvais rendement des régulateurs linéaires, est lié au "DROP" pour lequel on peut observer simultanément une tension à ses bornes et un courant le traversant.

En simplifiant, le régulateur linéaire se comporte comme une résistance série variable.

Le régulateur à découpage va éviter cette simultanéité de courant / tension en utilisant des transistors fonctionnant en commutation. Si le transistor est passant, il y a du courant mais la tension à ses bornes est proche de zéro ; si le transistor est bloquant, le courant est nul.

On a bien une puissance proche de zéro dissipée par un transistor en commutation !

En combinant la commutation à des réservoirs d'énergie (comme le condensateur et la bobine), le rendement des régulateurs à découpage est bien meilleur que pour les linéaires.

**Convertisseur Buck** ou hacheur série : Convertit la tension en une tension plus faible.

**Convertisseur Boost** ou hacheur parallèle : Convertit la tension en une tension plus élevée.

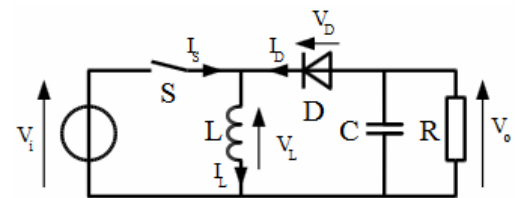
### Convertisseur Buck-Boost

L'interrupteur S symbolise le découpage, la bobine L stocke de l'énergie en courant et le condensateur C en tension.

Lorsque S est fermé,  $I_L$  augmente et le condensateur (borne positive en dessous  $\rightarrow V_0 < 0$ ) se décharge lentement dans R.

Lorsque S est ouvert,  $I_L$  reste positif mais diminue  $\rightarrow V_L < 0$ .

La bobine cède de l'énergie à la charge et au condensateur.



### Principe de l'alimentation FLYBACK

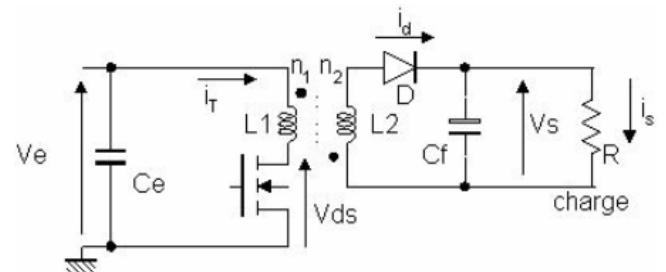
La partie droite du montage est l'équivalent des éléments L-D-C-R du convertisseur Buck-Boost.

Le sens de la diode a changé pour avoir  $V_s > 0$ .

Le transfo qui apporte une isolation galvanique, permet le rapport de transformation souhaité.

Les points indiquent les sens des enroulements.

On applique un signal PWM sur le transistor.



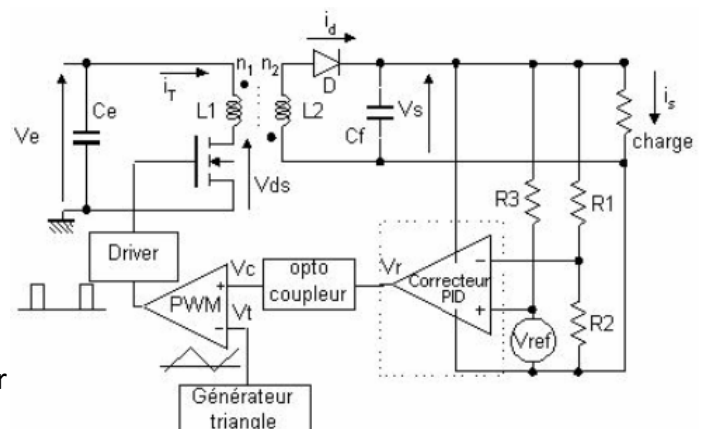
### Gestion de la régulation à l'aide d'un circuit fermé

Ce montage complète le précédent en ajoutant la gestion du PWM par boucle fermée.

On peut voir que le PWM est fabriqué en sortie d'un comparateur qui reçoit un signal triangle  $V_t$  et un seuil  $V_c$ .

Comme le rapport cyclique du PWM est proportionnel au seuil  $V_c$ , on peut essayer de contrôler le seuil  $V_c$  pour contrôler le PWM.

La boucle fermée va tenir compte de la différence entre  $V_{ref}$  et une fraction de  $V_s$  pour influencer le PWM et maintenir  $V_s$  constant.

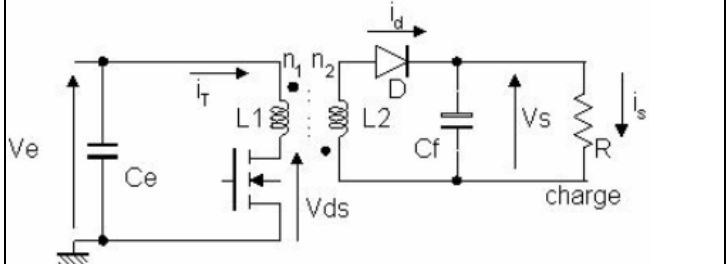


En plus des alimentations à découpage Flyback, on trouve également les Forward et les Push Pull.

Quelques références : <https://www.larmand.fr> <http://vincent.boitier.free.fr> <https://fr.wikipedia.org>

**Partie Eo : Exercices sur l'alimentation DC**

- 1.) On utilise une batterie de 9V pour alimenter un régulateur linéaire dont la tension de sortie est de 5V. En négligeant le courant de repos du régulateur, calculez le rendement de l'alimentation pour une charge résistive  $R_L = 500 \Omega$ .
- 2.) Avec les mêmes données que l'exercice précédant, calculez le rendement pour deux valeurs de charges ( $R_L = 500 \Omega$  et  $R_L = 10 \Omega$ ) en considérant cette fois un courant de repos de 5mA.
- 3.) Pour créer une tension de 5V à partir d'un régulateur linéaire dont le DROP minimum est de 1V, en supposant que l'on puisse annuler le courant de repos, calibrez la tension d'entrée pour optimiser le rendement  $\eta$ . Que vaut  $\eta$  dans ce cas ?
- 4.) Dessinez un signal PWM dont les niveaux de tension sont 0V / 24V, de rapport cyclique 10% et de fréquence 100 kHz. Que vaut la tension moyenne?
- 5.) Tentons de représenter quelques chronodiagrammes du circuit ci-dessous pour nous aider à comprendre le principe de l'alimentation à découpage Flyback.

On supposera que : $V_e = 24V,$ $V_s = 5V,$ $R = 10 \Omega,$ Le rapport cyclique $\alpha$ du PWM = 10%, La fréquence de découpage = 100 kHz	
--	--

On supposera pour simplifier que le transistor est assimilable à un interrupteur parfait, que le seuil de la diode peut être négligé et que le seul consommateur d'énergie active est R. En considérant que l'énergie apportée par  $V_e$  sur un cycle est égale à l'énergie consommée par la charge, calculez  $I_T$  moyen ( $I_{T\_MOY\_T}$ ) calculé sur une période T.

On peut poser l'intervalle  $[0, \alpha T]$  comme étant l'intervalle de conduction du transistor et l'intervalle  $[\alpha T, T]$  son intervalle de blocage. Ce qui permet de trouver la valeur de  $I_T$  moyen valable sur l'intervalle  $[\alpha T, T]$ , nous l'appellerons  $I_{T\_MOY\_PWM\_ON}$ , calculez sa valeur.

Avec la formule de la moyenne pondérée :  $I_{T\_MOY\_T} = \alpha * (I_{T\_MOY\_PWM\_ON}) + (1 - \alpha) * 0$

Calculez ensuite la valeur de **L1** en imaginant que le courant  $I_T$  dans l'intervalle  $[0, \alpha T]$  croit linéairement de 0 à  $I_T$  max (avec une moyenne de  $I_{T\_MOY\_PWM\_ON}$ ) due à  $V_e$  constant.

Tracez le chronodiagramme de  $V_{ds}$  et  $I_T$  pour  $\alpha = 10\%$  (ne soyez pas dérangé si vous constatez une discontinuité de courant au sein le L1 qui n'est qu'une partie du transfo).

Que faut-il modifier pour avoir un nouvel état d'équilibre avec  $R = 5 \Omega$  ? Calculez.

Calculez la valeur limite  $R_{LIM}$  de la charge pour un PWM de 100% (puissance maximale).

Dimensionnons  $C_f$  de manière à avoir  $R_{LIM} * C_f = 100 * T$ , calculez **Cf**.

L'ondulation résiduelle que l'on retrouvera en sortie sera liée à la valeur de  $C_f$  et des courants de charge/décharge. Comme pour un condensateur,  $q = C * u$ , on imaginera que l'ordre de grandeur de l'ondulation  $c_{\Delta c} = \Delta V_s = (1/C_f) * I_{S\_MAX} * T$ . Estimez  $\Delta V_s$ .

## Partie Eo : Les accumulateurs

### Principe général d'une pile, d'un accumulateur

En créant une différence de potentiel entre ses bornes<sup>\*</sup>, la pile (ou l'accu) permet de générer un courant dans un circuit à l'aide d'un phénomène électrochimique : l'oxydoréduction.

L'oxydation permet la libération d'électrons, exemple :  $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^{-}$

La réduction est liée à l'absorption d'un (de) électron(s), exemple :  $MnO_2 + H^+ + e^{-} \rightarrow MnO(OH)$

La pile va permettre de libérer des électrons (oxydation) à partir de sa borne - qui seront absorbés (réduction) au niveau de sa borne +.

En générant du courant, la composition chimique de la pile va se modifier progressivement.

Par exemple pour une pile saline, l'équation globale est :  $Zn + 2MnO_2 + 2H^+ \rightarrow Zn^{2+} + 2MnO(OH)$

Contrairement à la pile, l'accumulateur permet de renverser le sens des réactions.

### Caractéristiques des accumulateurs

La tension par élément [V] est lié au type d'accu. En série, les tensions s'additionnent.

La capacité en [Ah] (= 3600 C) dépend principalement de la taille de l'accu (AA, AAA, ...).

La densité d'énergie en Wh/kg (ou Wh/l) indique l'énergie exploitable par kg (ou l) de l'accu.

La densité de puissance en W/kg donne la puissance de pointe maximale par kg d'accu.

La durée de vie correspond au nombre de cycles charge/décharge "exploitables".

L'autodécharge est classiquement donnée en % par mois.

La résistance interne ( $< 1\Omega$ ) correspond à  $R_{TH}$  d'un schéma équivalent de Thévenin.

### Les accumulateurs les plus utilisés aujourd'hui et leurs caractéristiques

Nous retiendrons les batteries au plomb (Pb), les "nickel-métal-hydrure" (NiMH) et deux sortes de batteries au lithium : lithium-ion (Li-ion) et lithium-polymère (Li-Po).

Les caractéristiques données ci-dessous sont données à titre indicatif.

	Tension par élément [V]			Densité massique [Wh/kg]	Puissance max massique [W/kg]	Durée de vie (nb de cycles)	Autodécharge % par mois
	$U_{MIN}$	$U_{NOM}$	$U_{MAX}$				
<b>Pb</b>	1,8	2,0	2,2	30 - 50	700	400 - 800	5%
<b>NiMH</b>	1,0	1,2	1,4	60 - 110	900	800 - 1000	20%
<b>Li-ion</b>	2,8	3,6	4,2	90 - 180	1500	500 - 1000	10%
<b>Li-Po</b>	2,8	3,7	4,2	100 - 130	250	200 - 300	10%

### Les précautions d'utilisation

Dans tous les cas, la durée de vie de la batterie dépend fortement de sa manipulation !

Le plus facile à manipuler est l'accu au plomb, vient ensuite le NiMH et enfin le lithium.

En pratique l'accu au plomb peut se charger à tension constante, les NiMH à courant constant et les batteries au lithium nécessitent des chargeurs spécialisés.

Idéalement on charge les accus NiMH à courant  $I [A] \approx 0,2 * \text{Capacité [Ah]}$  et on s'arrête dès que  $dV/dt \approx 0$  ; la charge des accus au lithium se fait en 2 phases : I constant puis U constant.

Il est utile de bien se renseigner sur les précautions et spécificités de votre batterie, par exemple : l'accu au Pb accepte bien les pointes de courant, les NiMH ne resteront pas chargées très longtemps, les accus au lithium nécessitent beaucoup de précautions,...

**Références :** [claude.lahache.free.fr/coursts1elpartie/piles-et-accus.pdf](http://claude.lahache.free.fr/coursts1elpartie/piles-et-accus.pdf) [robertponge.com/telechargements/ebooks/accus.pdf](http://robertponge.com/telechargements/ebooks/accus.pdf)

\* Pour une pile, la borne négative est l'anode qui donne des électrons. La cathode (+) capte les électrons.

**SITUATION D'APPRENTISSAGE 12**

Fiche de description

**Modification d'un circuit d'alimentation pour fonctionner également sur batterie.**
**Description**

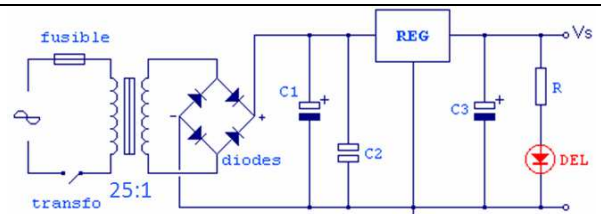
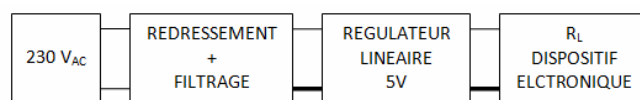
Un dispositif électronique est alimenté à l'aide d'un circuit d'alimentation simple fourni. On peut symboliser ce dispositif par une charge  $R_L$  connectée entre  $V_S$  et la masse. Nous ne connaissons pas la valeur de  $R_L$  mais nous savons que l'énergie extraite du secteur (230 V<sub>AC</sub> / 50 Hz) est de 0,156 kWh lorsque le circuit reste connecté pendant 24 heures. L'idée est de modifier le circuit d'alimentation actuel pour que notre dispositif électronique puisse fonctionner sur batterie (8 éléments NiMH comme représenté sur le "schéma bloc"). L'utilisation du dispositif électronique sera classiquement sur batterie la journée et sur secteur la nuit. Pour ce faire, l'autonomie de la batterie doit être supérieure à 12 heures.

**Cahier des charges**

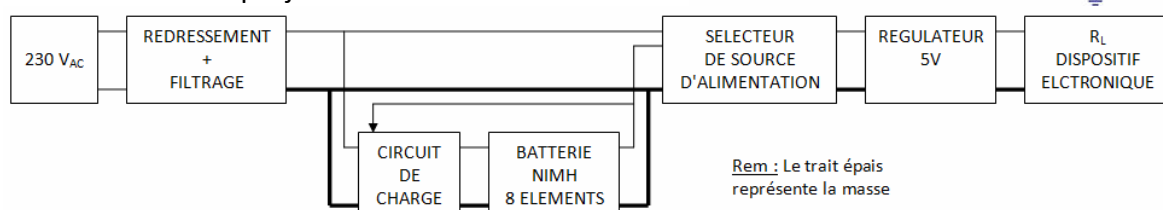
- 1.) Estimez la valeur de  $R_L$ , la puissance absorbée au niveau du secteur, la puissance consommée par la charge et le rendement de l'alimentation.
- 2.) En considérant des accumulateurs NiMH de 4000mAh, calculez l'autonomie maximale du dispositif alimenté sur batterie. Que vaut le rendement dans ce cas ?
- 3.) Dans l'éventualité où l'autonomie calculée n'atteint pas 12 heures, que proposez-vous comme modification au circuit? Quelle autonomie pouvez-vous espérer alors ?
- 4.) En considérant que l'on recharge les batteries tous les jours en fin de journée, quelle fraction du courant nominal préconisez-vous pour le circuit de charge? Justifiez.
- 5.) Dans ces conditions, quelle résistance série peut-on imaginer pour que le circuit de charge se fasse à courant constant ? Quelle est le temps maximum de charge?
- 6.) Dans le cas de notre application, combien de jours peut-on espérer voir notre batterie NiMH fonctionner avant de devoir la remplacer?
- 7.) Tentez de retrouver le schéma électrique du "sélecteur de source d'alimentation" sachant que c'est l'alimentation de tension la plus élevée qui sera sélectionnée. Indice : Le schéma est constitué de deux diodes.
- 8.) Quelle(s) modification(s) pourra-t-on trouver au niveau des signaux/grandeurs électriques du régulateur lorsqu'on passe d'une alimentation secteur à la batterie ?

**Schémas**

"Schéma bloc" et schéma actuels du projet.



"Schéma bloc" du projet futur.



Rem : Le trait épais représente la masse

**SITUATION D'APPRENTISSAGE 12** :**Evaluation de l'UAA2**

Traitement du signal

Date	Classe	Prénom + nom

En vous basant sur la fiche de description de la situation d'apprentissage 12, rédigez ci-dessous un rapport concernant les points 1 à 8.

**Base de planification jusqu'à la situation d'apprentissage 13**

SEM 1	Présentation de la situation d'apprentissage 13	Le principe du pont en H	Constitution d'un signal analogique en intégrant le PWM
SEM2	Etude du circuit d'interface des moteurs	<b>Manip / exo</b> Soudure de la carte moteur	<b>Manip / exo</b> Soudure de la carte moteur
SEM3	<b>Manip / exo</b> Câblage / assemblage du robot	<b>Manip / exo</b> Câblage / assemblage du robot	<b>Situation d'apprentissage 13 : Réalisation, dossier et présentation orale</b>

**Planification prévisionnelle jusqu'à la situation d'apprentissage 13**

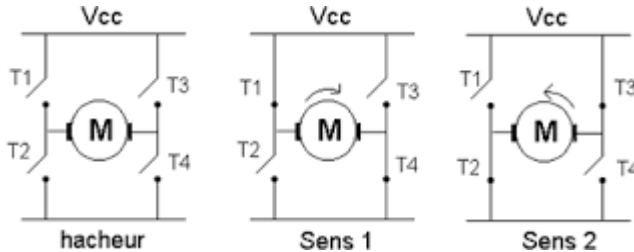
Semaine	Jour	Jour	Jour

Compléter le planning prévisionnel en classe

<b>SITUATION D'APPRENTISSAGE 13</b>	Fiche de description
<b>Recherche et développement d'un prototype de robot commandé par API</b>	
<b>Description</b>	
Sur base du dossier technique du robot qu'on vous a fourni, vous devez réaliser un prototype. D'autre part, on vous demande de rédiger un dossier technique et une présentation orale.	
<b>Cahier des charges</b>	
<ol style="list-style-type: none"><li>1.) Faites l'inventaire des composants nécessaires au circuit imprimé du robot et vérifiez que vous êtes en possession de tous les composants. N'hésitez pas à faire des photos au fur et à mesure de votre réalisation (PCB vierge, PCB soudé, assemblage,...) pour pouvoir alimenter votre dossier technique.</li><li>2.) Soudez le circuit imprimé du robot en commençant par les plus petits composants en premier (résistance, diode,...) puis les supports DIL pour les AOP. Poursuivez avec les composants un peu plus grands (condensateurs, transistors,...). Terminez vos soudures par les connecteurs et les relais.</li><li>3.) Interconnectez électriquement votre PCB d'interface à vos deux circuits de commande moteur. Rendez l'ensemble solidaire à l'aide d'entretoises.</li><li>4.) Assemblez mécaniquement la base de votre robot sur laquelle vous pouvez fixer votre circuit d'interface moteurs.</li><li>5.) Rédigez votre dossier technique en respectant le canevas suivant :<ul style="list-style-type: none"><li>- Introduction</li><li>- Partie réalisation</li><li>- Description générale des cartes industrielles pilotant les moteurs</li><li>- Schéma bloc du prototype + description du rôle de chaque bloc</li><li>- Analyse et description des montages (principe du montage, rôle des composants, ...)</li><li>- Une étude au niveau fréquentiel</li><li>- Conclusions</li><li>- Annexes (dossier technique fourni, datasheets, ...)</li></ul></li><li>6.) Présentez votre réalisation (carte électronique soudée et prototype assemblé).</li><li>7.) Présentez oralement vos diapositives en respectant le canevas suivant :<ul style="list-style-type: none"><li>- Le principe du pont en H pour piloter les moteurs DC</li><li>- Le fonctionnement général des cartes industrielles pilotant les moteurs</li><li>- Le schéma bloc du prototype avec sa description</li><li>- L'analyse et la description des montages de la carte d'interface</li><li>- Une étude au niveau fréquentiel</li></ul></li></ol>	

## Partie Eo : Le principe du pont en H

On parle en général du pont en H pour la commande des moteurs car il permet de contrôler sa polarité. Exemples de ponts en H connus en électronique : L298, L293, L293D

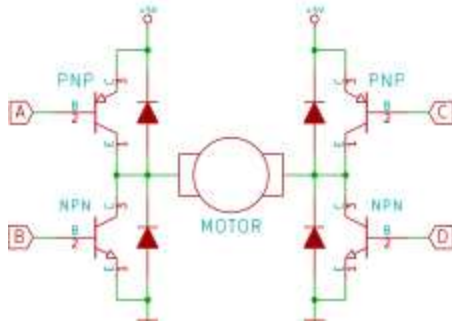


[www.technologuepro.com](http://www.technologuepro.com)

Le principe du pont en H schématisé ici montre que le sens de rotation du moteur (M) dépend de l'état des interrupteurs T1 à T4; On voit qu'on ferme T1 et T4, le moteur tourne dans un sens, en fermant T2 et T3, le moteur tourne dans l'autre sens.

Les interrupteurs sont en réalité des transistors commandés par des signaux de commande.

On peut les représenter à l'aide de transistors bipolaires ou à effet de champ.

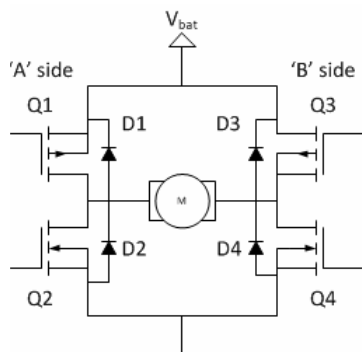


<https://openclassrooms.com>

Ici T2 et T4 sont des NPN et T1 et T3 des PNP car il est plus simple de contrôler la conduction de la jonction base-émetteur d'un transistor bipolaire lorsque le potentiel de l'émetteur est fixé.

Il est également nécessaire d'ajouter des résistances de base aux 4 transistors car les bipolaires sont commandés en courant.

On voit aussi apparaître des diodes de roues libres qui, comme pour le relais, assurent une protection .



Pour un canal N (partie inférieure), le transistor MOSFET à enrichissement permet de contrôler la conduction du transistor à l'aide d'une tension VGS positive. Le canal (drain-source) se comportera comme une résistance d'autant plus faible (proche d'un interrupteur fermé) que VGS est élevé (caractéristique  $I_D$ ). Pour un canal P, on doit changer le signe des tensions.

La technologie CMOS utilise la complémentarité du canal N et P.

[http://www.modularcircuits.com/blog/articles/h-bridge-secrets/h-bridge\\_drivers/](http://www.modularcircuits.com/blog/articles/h-bridge-secrets/h-bridge_drivers/)

On dit qu'on utilise 2 demis ponts (half bridge) pour commander un moteur DC dans les deux sens. Pour le commander dans un seul sens on pourrait utiliser un demi-pont uniquement.

Pour influencer la tension aux bornes du moteur DC, on utilise une astuce qui va modifier la tension moyenne en utilisant un signal numérique.

On va par exemple fournir un signal de type carré dont les niveaux sont 0 - 5V et faire varier le rapport cyclique (fraction de la période dont le signal est au niveau haut).

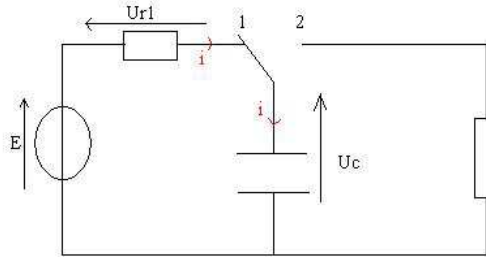
A titre d'exemple, si on imagine un rapport cyclique de 50%, c'est comme si on demandait au moteur de tourner vite (tension de 5V) pendant 50% du temps et d'être à l'arrêt (tension de 0V) pendant 50% du temps.

Si les commandes AVANCER - STOP - AVANCER - STOP - ... sont assez rapides, le moteur se comportera comme si on lui appliquait la tension moyenne de 2,5V à ses bornes.

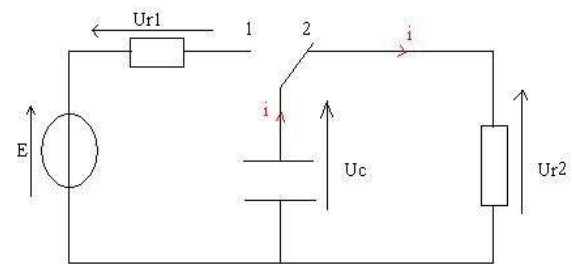
## Partie Eo : Constitution d'un signal analogique en intégrant le PWM

### Comportement d'une cellule RC sur un échelon de tension

Si  $U_c(t=0) = 0$ ,  $u_c(t) = E(1 - e^{-t/\tau})$  avec  $\tau = R.C$

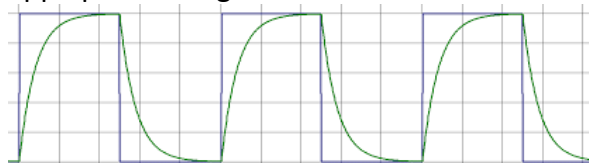


Si  $U_c(t=0) = E$ ,  $u_c(t) = E \cdot e^{-t/\tau}$  avec  $\tau = R.C$

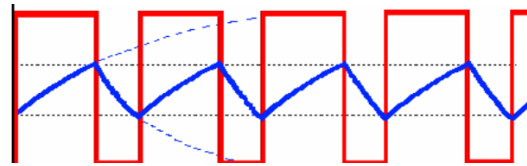


### Une cellule RC correspond à un filtre passe-bas, appelé souvent intégrateur.

On dit aussi qu'un filtre passe-bas est un montage intégrateur; cependant, pour que ce soit vrai, il faut que la période du signal carré soit bien inférieure à la constante de temps  $\tau = RC$ . Ci-dessous (en fonction du temps) l'évolution de la tension de sortie d'une cellule RC en appliquant un signal carré sur l'ensemble.



$T > \tau$  : le signal de sortie n'est pas un signal triangle (attendu par l'intégration d'un carré)

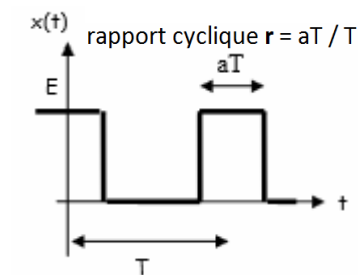


$T < \tau$  : Ici le signal de sortie s'approche d'un signal triangle (attendu par l'intégration d'un carré)

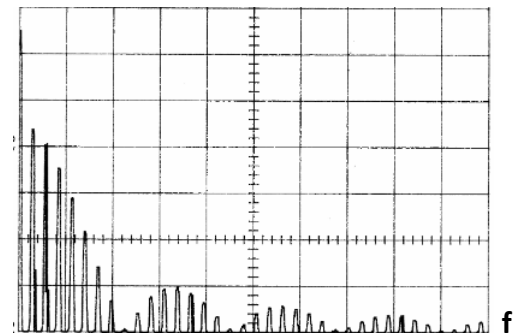
### Le spectre d'un signal PWM

Un signal carré pur (rapport cyclique de 50%) a un spectre avec des raies décroissantes.

Un signal PWM voit les raies s'atténuer en  $(\sin x)/x$ . Voir représentation à droite.



Jean-philippe muller (Juil 2002)



### Signal utile en sortie de la cellule RC

L'objectif du filtre RC est ici de constituer un signal analogique dont la valeur représente la tension moyenne (composante DC) du signal PWM appliqué à son entrée. On remarque cependant que même si on maintient un signal PWM de rapport cyclique  $r = 50\%$ , de tension moyenne  $U_{MOY} = (U_{MAX} + U_{MIN})/2$ , il subsiste une ondulation de forme triangulaire autour de la tension moyenne. On doit alors accepter une petite ondulation résiduelle dont l'amplitude sera limitée par une valeur suffisante de la fréquence du PWM et/ou de la constante  $\tau = RC$ . D'autre part, on souhaite que la tension de sortie du filtre puisse suivre l'évolution du rapport cyclique  $r$  du signal PWM pour autant que  $r$  varie "suffisamment lentement". On dit parfois "une composante DC qui change" au lieu de "une composante AC basse fréquence".

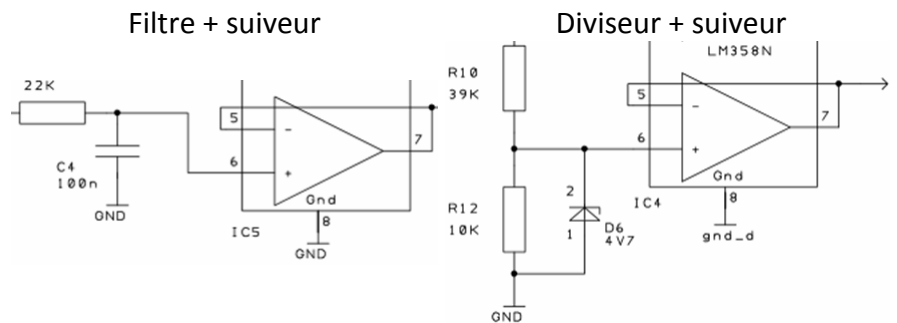
**Partie Eo : Etude du circuit d'interface des moteurs**

Le dossier technique du robot permet de voir que le circuit complet d'interface des moteurs exploite une carte moteur industrielle existante : PWM CCM-6N de Bringsmart.

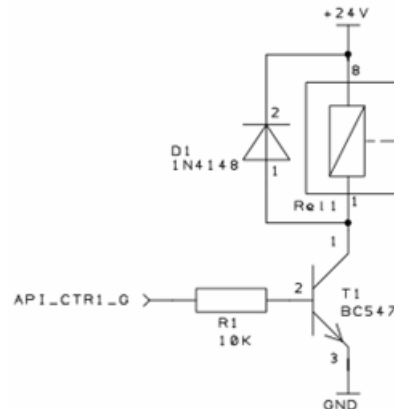
La carte moteur industrielle contient les connecteurs suivants :

- 2 contacts pour le moteur DC
- 2 contacts pour l'alimentation DC
- 3 contacts pour la résistance variable (réglage de la vitesse par tension analogique)
- 4 contacts pour un interrupteur trois positions et les pontages associés

- **Commande de la vitesse**  
L'API commande la vitesse par un signal PWM 0-24V. Ce signal passe par un filtre passe-bas et un suiveur. Ensuite on obtient une plage 0-5V par division avec une faible résistance de sortie.



- **Gestion du sens du moteur**  
L'API commande le sens des moteurs par des signaux 0-24V. Il doit pouvoir apparaître les courts-circuits que l'interrupteur 3 positions est susceptible d'apporter. Chaque court-circuit est apporté par un relais interfacé par un transistor en commutation.



La diode dite "de roue libre" sert à limiter la tension inverse qui peut apparaître aux bornes de la bobine du relais. Cette tension inverse apparaît lorsqu'il y a une variation rapide du courant. En limitant la tension inverse au seuil de la diode, on protège le transistor en commutation.

Le moteur DC utilisé a la référence A58SW-555B, il possède un encodeur. Il y a aussi un réducteur dont le rapport de réduction = 31 pour le modèle 24V - 260 RPM.

- **L'encodeur**  
Déterminer la vitesse de rotation et le sens grâce aux signaux A et B. Il utilise l'effet Hall Les signaux A et B sont de type collecteur ouvert avec une résistance de pull-up intégrée de 10K.

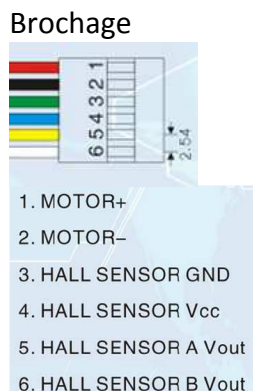
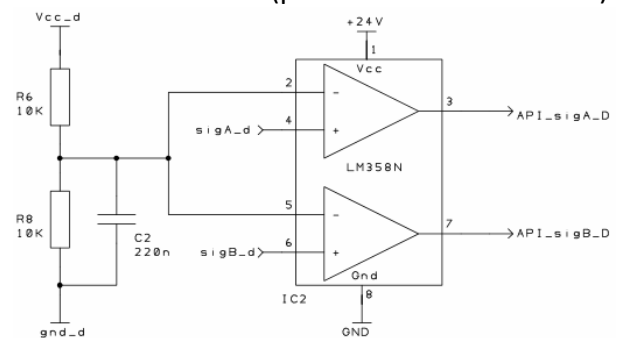



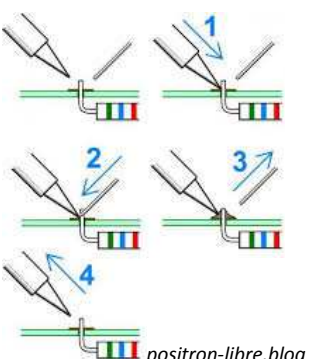
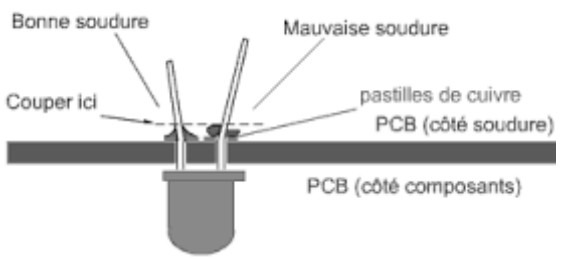
Schéma d'interface (pour entrées API en PNP)



On trouve un diviseur suivi d'un comparateur.

## Partie Eo : Soudure de la carte moteur - partie 1

Pour l'ordre des soudures, nous souderons les composants du plus petit (le moins haut) au plus grand. L'idée est de pouvoir placer les composants à plat sur la "face composants" (Top View) et de retourner le PCB pour les souder alors qu'ils sont maintenus à plat. Comme illustré ci-dessous, on peut s'aider d'un gabarit de pliage, souder le composant et vérifier que la concavité de la soudure est correcte (ne pas mettre trop de soudure).

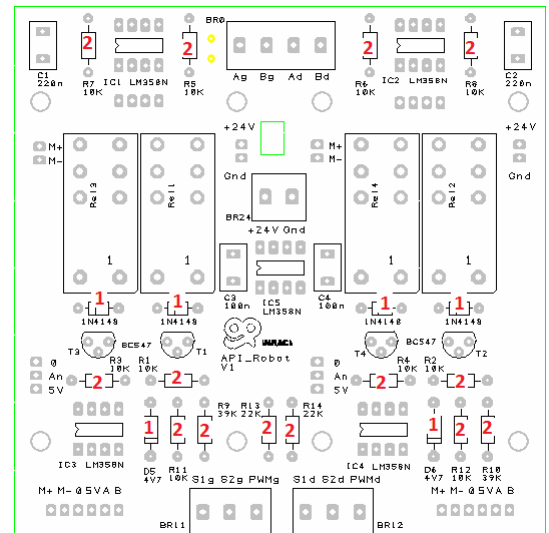
<p><b>Gabarit de pliage</b></p>  <p>On place le composant suivant l'empattement souhaité.</p>	<p><b>Marche à suivre</b></p>  <p><i>positron-libre.blog</i></p>	<p><b>Résultat souhaité</b></p>  <p><i>courstechinfo.be</i></p> <p>Le coté concave de la soudure doit être vers l'extérieur (contrairement à une boule).</p>
--	--	--

### Soudure des premiers composants et inventaire

Ici à droite une proposition d'ordre de soudure (1 les diodes puis 2 les résistances).

Il est conseillé d'avoir le schéma et le PCB sous la main avant de souder. Munissez-vous du dossier technique.

- 1<sup>eres</sup> soudures :**
- 1N4148 (4x)
  - Zéner 4V7 (2x)
  - 10K (10x)
  - 39K (2x)
  - 22K (2x)



Une fois les soudures réalisées, faites l'inventaire des autres composants et vérifiez que vous êtes en possession de ceux-ci.

Analysez la manière dont sera réalisé le câblage. Généralement les cosses sont préconisées, on acceptera toutefois du multibrin torsadé et étamé.

### Préparation du câblage

Comme représenté ici, on va choisir du multibrin qu'on torsade puis qu'on étame.

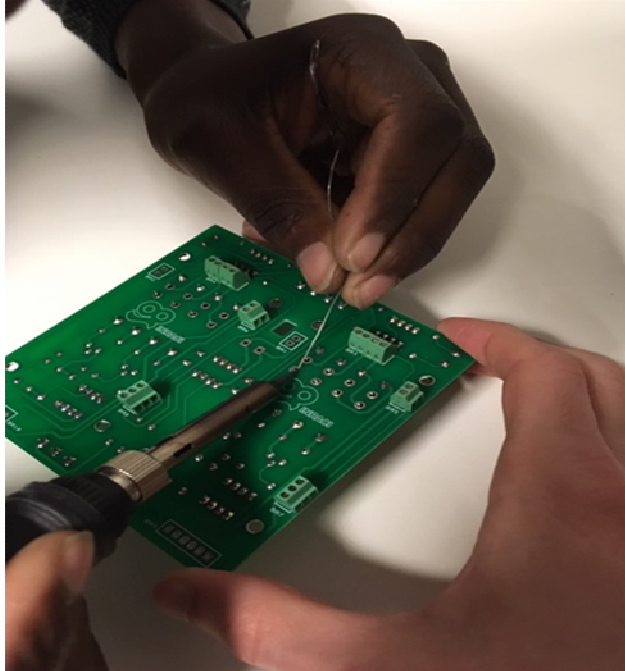


On essaiera dans la mesure du possible à choisir des couleurs de câbles qui facilitent l'interprétation des signaux. Par exemple Rouge/Noir pour +5V/Gnd, Brun pour +24V, ... S'il faut faire un raccord ou une démultiplication de câbles, on utilisera de la gaine thermo !

**Partie Eo : Soudure de la carte moteur - partie 2**

Les photos ci-dessous sont tirées du dossier de Gilles Slotte.

La sérigraphie nous fait remarquer que certains composants sont soudés du "mauvais côté", ce sont certains connecteurs qui permettent l'interconnexion aux cartes industrielles

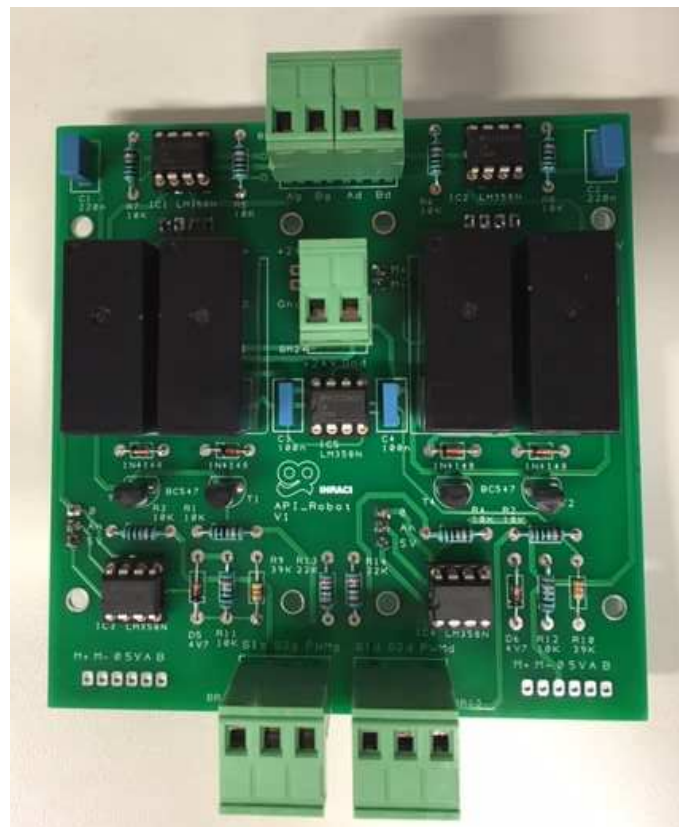


Pour la suite des soudures, on continue par procéder dans l'ordre des plus petits composants vers les plus gros.

On veillera à mettre des supports DIL pour les ampli opérationnels en respectant le sens indiqué par la sérigraphie.

On s'assurera également de placer les connecteurs (avec détrompeurs) de telle manière que le câblage sera orienté vers l'extérieur.

Les connexions prévues vers les moteurs (non soudées ci-contre) seront réalisées au travers d'un connecteur approprié ou d'un sécable mâle (voir ci-après).

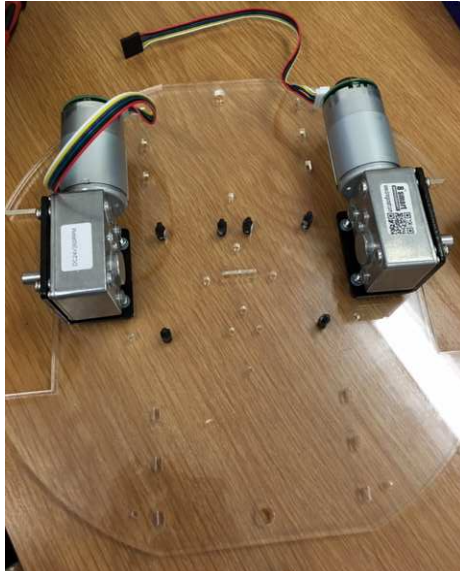


## Partie Eo : Assemblage du robot

Les photos ci-dessous sont tirées du dossier de Gilles Slotte.

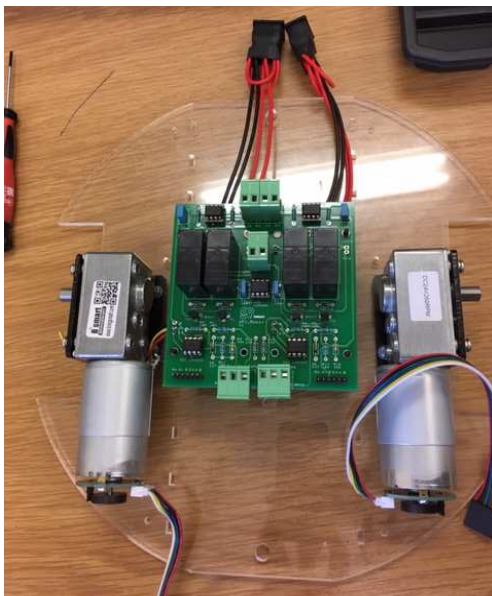
On commencera par fixer les supports moteurs sur le châssis puis fixer les moteurs.

On veillera à fixer les moteurs de telle sorte à trouver les axes centrés par rapport au châssis.



Les interrupteurs de gestion de marche des cartes industrielles seront décâblés afin de permettre l'interconnexion du PCB d'interface aux cartes industrielles.

L'objectif est de trouver les cartes interconnectées et solidaires mécaniquement à l'aide d'entretoises. L'ensemble fixé au châssis comme sur les photos ci-dessous.



Les batteries seront disposées de part et d'autre des PCB.

Un deuxième étage est prévu pour placer l'automate fixé sur un rail-DIN.

**Base de planification jusqu'à la situation d'apprentissage 14**

SEM 1	Notions de base du Grafcet	<b>Manip / exo</b> Exercices de Grafcet	Le langage SFC
SEM2	Introduction à la régulation	Régulation simple en boucle fermée	La régulation par action intégrale
SEM3	Le régulateur PI	L'utilisation de Laplace en régulation	<b>Situation d'apprentissage 14</b>

**Planification prévisionnelle jusqu'à la situation d'apprentissage 14**

Semaine	Jour	Jour	Jour

Compléter le planning prévisionnel en classe

## Notions de base du Grafcet (Graph Fonctionnel de Commande Etape Transition)

Ce cours, inspiré des diapositives de David Rouchard (ECAM), a pour objectif de comprendre le mécanisme général du Grafcet au travers de certaines fonctionnalités uniquement.

### Éléments du Grafcet



Une étape représente souvent la situation où l'on est en train de faire une (des) action(s). Chaque étape est identifiée par un numéro unique. Un point apparaît sur une étape active. Une condition-transition (C.T.) est une expression booléenne (condition) nécessaire au passage d'une étape à une autre (transition). La transition ne peut avoir lieu que si la C.T. est vraie et que toutes les étapes précédentes directement connectées à cette C.T. sont actives.

### Exemple de Grafcet

#### Entrées / Capteurs :

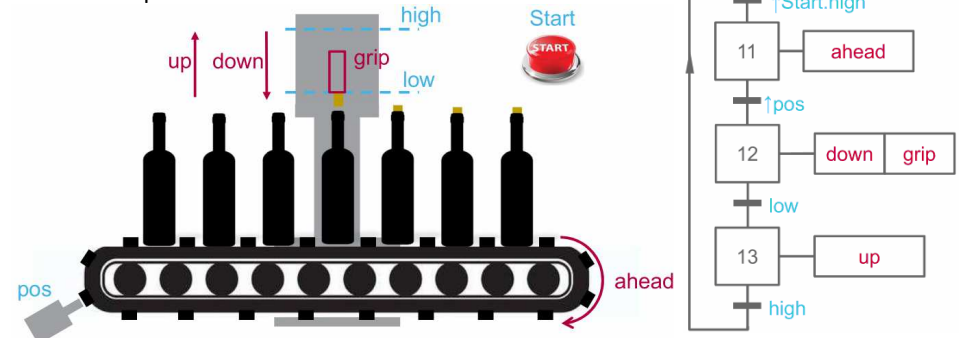
Start → pour démarrer  
 pos → position tapis OK  
 high → côté bouchon  
 low → côté bouteille

#### Sorties / Actionneurs :

ahead → avancer tapis  
 grip → saisir bouchon  
 up → monter pince  
 down → descendre pince

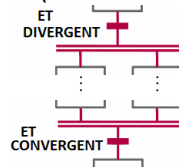
#### Placement de bouchons sur des bouteilles

Lors d'un flanc montant (symbolisé par une flèche montante) sur Start on place un bouchon sur la bouteille suivante.



### Règles et recommandations

- Tout Grafcet doit contenir au moins une étape d'initialisation (souvent la situation de repos et mise dans la boucle).
- Une étape active suivie d'une C.T. vraie activera, en aval, toutes les étapes connectées à cette C.T. → ET DIVERGENT
- Toutes les étapes reliées en amont à une C.T. doivent être actives pour permettre la transition → ET CONVERGENT
- Une étape désactivée tout de suite après son activation ne verra pas ses actions associées exécutées.
- Une étape réactivée tout de suite après sa désactivation sera assimilable à une étape active.



Lorsque la structure fait apparaître un ET divergent, il est recommandé de retrouver plus loin un ET convergent. Remarque : Il est souvent utile d'avoir une étape d'attente avant un ET convergent.

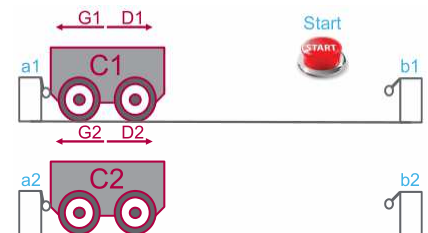
### Exercices Gestion de deux convoyeurs C1 et C2

#### Entrées / Capteurs :

Start → pour démarrer  
 a1 → C1 coté gauche  
 b1 → C1 coté droit  
 a2 → C2 coté gauche  
 b2 → C2 coté droit

#### Sorties / Actionneurs :

G1 → déplacer C1 à gauche  
 D1 → déplacer C1 à droite  
 G2 → déplacer C2 à gauche  
 D2 → déplacer C2 à droite



- 1.) Commandez C1 en l'autorisant à faire un aller-retour par un flanc montant sur Start.
- 2.) Commandez C1 en l'autorisant à faire un trajet (aller ou retour) par un flanc montant sur Start.
- 3.) Un flanc montant sur Start doit provoquer un aller-retour de C1 suivi d'un aller-retour de C2.
- 4.) Un flanc montant sur Start doit provoquer un départ simultané de C1 et C2.

Ce n'est qu'une fois qu'ils sont tous les deux arrivés (ils ne vont pas à la même vitesse) qu'ils reviennent à gauche.

## Exercices de programmation Grafset

### 1.) Gérez le fonctionnement d'un escalator une personne

On considère que l'escalator ne transportera au maximum qu'une seule personne à la fois.

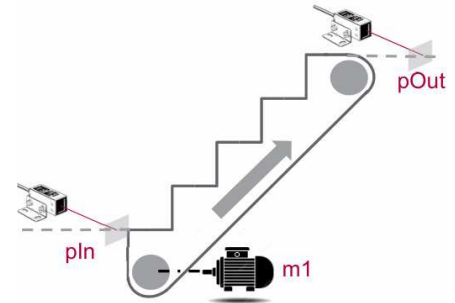
Le moteur doit démarrer lorsqu'une personne se présente à l'entrée de l'escalator et s'arrêter lorsqu'elle en sort.

#### Entrées / Capteurs :

pIn → présence à l'entrée  
pOut → présence à la sortie

#### Sorties / Actionneurs :

m1 → avancer escalator



### 2.) Gestion binaire par commande Start et Stop

On considère simplement que seuls les boutons Start et Stop commandent le tapis.

Si le bouton Stop est relâché, le tapis démarre sur un flanc montant de Start.

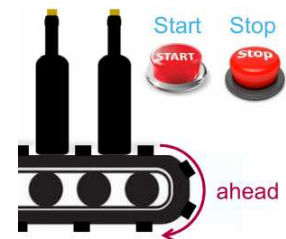
Le tapis s'arrête dès que Stop est enfoncé.

#### Entrées / Capteurs :

Start → pour démarrer  
Stop → pour arrêter

#### Sorties / Actionneurs :

ahead → avancer tapis



### 3.) Gérez le chargement et déchargement du Trolley

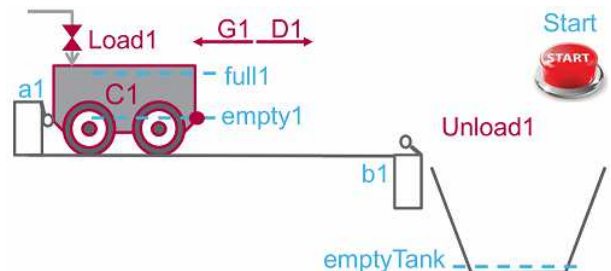
Le trolley commence un "chargement puis déchargement" sur un flanc montant de Start. Vous ne devez pas gérer le vidage du container mais vous assurer que celui-ci est vide avant de procéder au déchargement du trolley.

#### Entrées / Capteurs :

Start → pour démarrer  
a1 → C1 coté gauche  
b1 → C1 coté droit  
full1 → C1 est chargé  
empty1 → C1 est vide  
emptyTank → container vide

#### Sorties / Actionneurs :

Load1 → chargement C1  
Unload1 → déchargement C1  
G1 → déplacer C1 à gauche  
D1 → déplacer C1 à droite



### 4.) Gérez un nouveau placement d'un bouchon et d'une étiquette lors d'un flanc montant sur Start :

a.) De manière non efficace en plaçant d'abord le bouchon puis l'étiquette

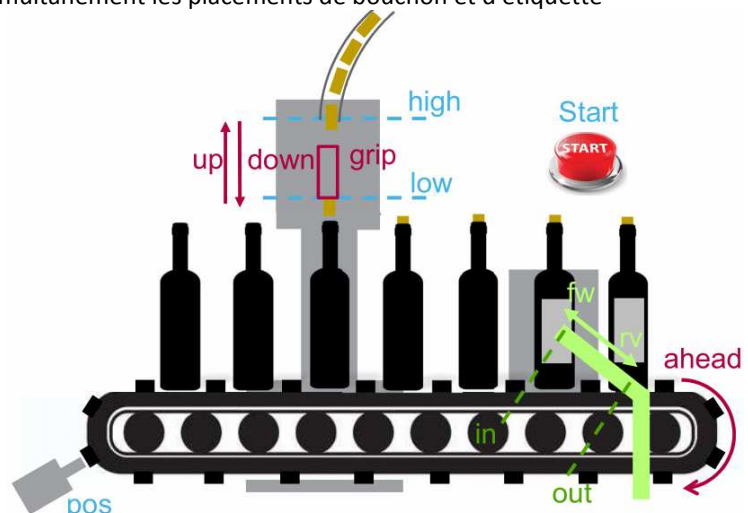
b.) De manière plus rentable en gérant simultanément les placements de bouchon et d'étiquette

#### Entrées / Capteurs :

Start → pour démarrer  
pos → position tapis OK  
high → côté bouchon  
low → côté bouteille  
in → placeur étiquette coté bouteille  
out → placeur étiquette hors bouteille

#### Sorties / Actionneurs :

ahead → avancer tapis  
grip → saisir bouchon  
up → monter pince  
down → descendre pince  
fw → placement étiquette  
rv → retour placeur d'étiquette



## Le langage SFC

Le langage SFC (Sequential Function Chart) est le langage qui ressemble au Grafcet qui est proposé au sein de certains environnements de programmation d'automates.

Les différents fabricants d'automates proposeront leurs environnements de programmation propriétaires avec leurs particularités. Parfois le SFC n'est même pas disponible.

Le Grafcet tel que nous l'avons vu ci avant est plutôt un outil permettant de décrire le cahier des charges. Il décrit, comme l'indique la lettre **f** de Grafcet, l'aspect **fonctionnel**.

Au niveau du Grafcet, on distingue le Grafcet de niveau 1 et le Grafcet de niveau 2.

Les exemples et exercices illustrés ci avant se situaient en réalité un peu entre les deux pour faire apparaître des situations relativement autonomes et cohérentes.

Le Grafcet de niveau 1 se contente de décrire la fonctionnalité du cahier des charges sans se soucier de la technologie utilisée ni de des modes de marches.

L'idée est de décrire ce qu'il faut faire sans détailler comment on le fait.

Dans les exemples et exercices que nous avons vus ensemble, nous n'avons pas pris en compte la technologie utilisée mais pris en compte parfois la gestion des marches/arrêts à l'aide des boutons Start/Stop.

Pour programmer une situation réelle, nous devons gérer les marches/arrêts (qui peut s'appuyer sur le GEMMA<sup>\*</sup>) mais aussi tenir compte de la technologie utilisée.

Par exemple, pour interfacer un vérin nous pouvons utiliser un distributeur à commande électrique ; le fait que ce dernier soit monostable ou bistable influencera les signaux de commande fournis par l'automate.

On peut alors réaliser un Grafcet de niveau 2 (parfois aussi appelé Grafcet technologique) qui contiendra les spécificités de marches/arrêts et technologiques nécessaires à la programmation d'une situation réelle. Au jour d'aujourd'hui, on ne peut pas encore insérer un Grafcet de niveau 2 directement dans l'automate, il faut encore le transposer dans le SFC de l'environnement utilisé.

Lorsqu'on programme notre automate, il est courant d'utiliser un ou plusieurs langages en complément du SFC. Le SFC convient bien pour gérer les modes de marches et la structure générale du programme, alors que d'autres langages sont plus adaptés pour définir les actions à effectuer. On peut par exemple définir les actions à effectuer en LADDER ou en ST (Structured Text). Le LADDER convient bien aussi pour définir les conditions transitions.

Afin de faciliter le DEBUG, il est recommandé de ne pas effectuer d'actions au sein du SFC mais de retrouver l'ensemble des commandes à un seul et même endroit.

---

\* Guide d'étude des modes de marche et d'arrêt

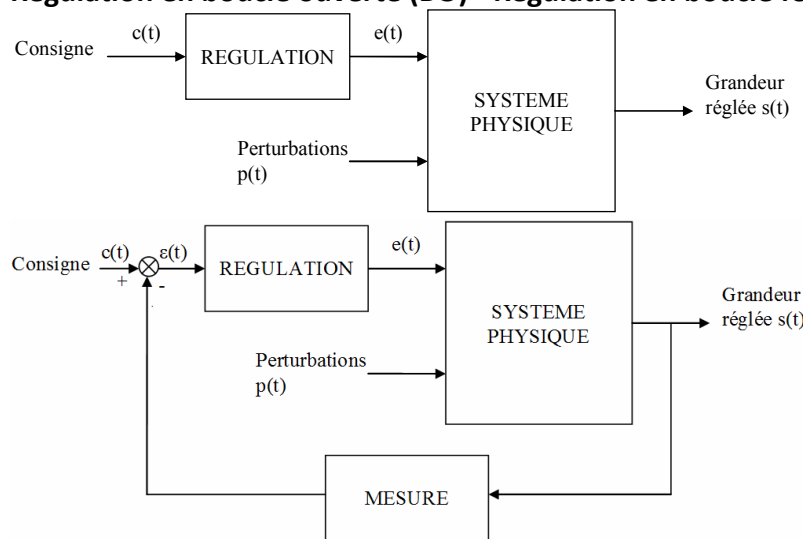
## Introduction à la régulation

La régulation est un ensemble de moyens mis en œuvre au sein d'un système physique pour agir sur une grandeur physique de ce système (la grandeur à régler ou la grandeur réglée) de sorte à atteindre l'objectif voulu (la consigne).

Pour un système soumis à une régulation, on appellera variable d'entrée tout ce qui agit sur l'état du système et variable de sortie tout ce qui caractérise le système.

On ne considèrera qu'une seule sortie  $s(t)$  (la grandeur réglée) et une seule entrée  $e(t)$  (la grandeur réglage). Toute autre influence sur le système est symbolisée par les perturbations.

### Régulation en boucle ouverte (BO) - Régulation en boucle fermée (BF)



En BO, le bloc régulation détermine la grandeur de réglage  $e(t)$  uniquement sur base de la consigne.

En BF, on mesure en permanence la grandeur réglée que l'on compare à la consigne pour déterminer l'erreur. Le bloc régulation détermine la grandeur de réglage  $e(t)$  sur base de l'erreur  $\varepsilon(t)$  et de son évolution.

Contrairement à la BO, la BF tient compte des perturbations grâce à sa structure.

### Pourquoi l'expression de l'erreur est-elle : $\varepsilon(t) = c(t) - s(t)$ ? (et non l'opposé ?)

L'idée de la structure en BF est de tenter d'ajuster la grandeur de réglage de manière à annuler/corriger l'erreur. Si  $s(t) > c(t)$ , il faudrait tenter de diminuer la grandeur à régler ! On prendra l'exemple d'un thermostat (régulation de température au travers d'une vanne).

- 1.) On supposera qu'une augmentation de la grandeur de réglage aura une influence positive sur l'augmentation de la grandeur à régler. Par exemple le réglage de l'ouverture (et non la fermeture) de la vanne pour influencer la température.
- 2.) On supposera que la tendance générale du bloc régulation est d'apporter au système une grandeur de réglage de même signe que l'erreur. Ceci signifie qu'avec un régulateur à action proportionnel (voir plus tard), on utilise un coefficient  $K_p$  positif. Par exemple avec une erreur de température positive, on ouvre la vanne.

Imaginons qu'il fasse 10 °C dans la pièce et que l'on souhaite 20 °C, il y a une erreur positive de 10 °C qui sera communiquée au bloc régulation qui aura tendance à agir positivement sur la vanne (point 2.). La grandeur de réglage positive agira sur l'ouverture de la vanne qui agira de sorte à augmenter la grandeur à régler (point 1.). Globalement le système en BF avec la convention  $\varepsilon(t) = c(t) - s(t)$  aura tendance à agir de sorte à corriger l'erreur.

### Exercices, dessinez le système en BF en spécifiant précisément les grandeurs :

- a.) Régulation de vitesse d'une roue de robot.
- b.) Régulation du niveau dans une cuve.

## Régulation simple en boucle fermée

Il est courant de trouver des logiciels qui permettent de faire de la modélisation et de la simulation de systèmes soumis à une régulation. MATLAB par exemple propose des supports de cours (mathworks.com) où l'on retrouve des spécificités telles qu'illustrées ci-dessous.

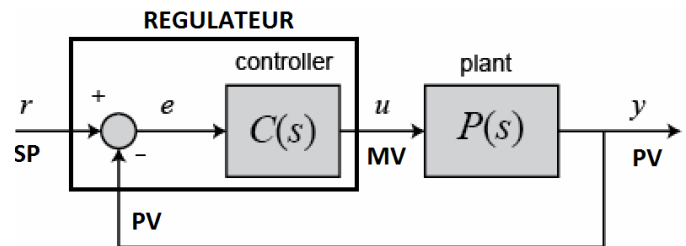
Par rapport au schéma BF déjà vu :

Le bloc régulation  $\leftrightarrow$  *controller*

Le bloc système physique  $\leftrightarrow$  *plant*

Le bloc mesure est supposé parfait.

Les perturbations ne sont pas représentées.



La consigne notée  $r$  correspond au SET POINT (SP).

La grandeur réglée  $y$  correspond à PROCESS VARIABLE (PV).

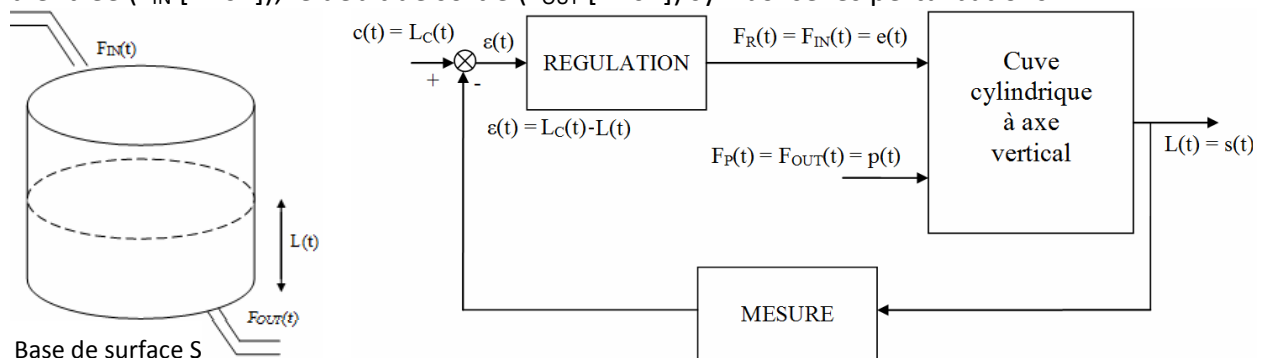
La grandeur de réglage  $u$  correspond à MANIPULATED VARIABLE (MV).

L'erreur  $\epsilon$  (ici notée  $e$ ), correspond bien à la définition vu précédemment (consigne - mesure).

Il est classique de trouver un bloc régulateur qui fait lui-même le calcul de l'erreur.

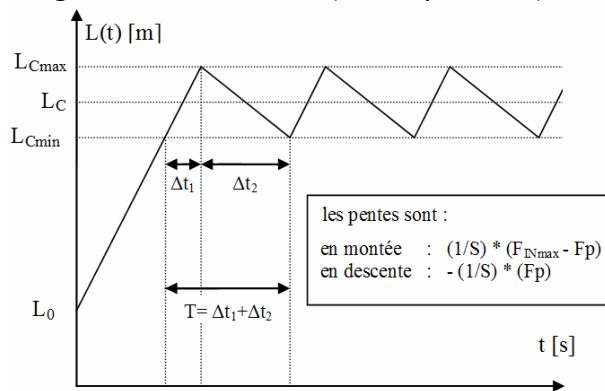
### Exemple didactique (régulation de niveau d'une cuve cylindrique à axe vertical)

On se rattache à cet exemple de régulation du niveau (Level [m]) en agissant sur le débit d'entrée ( $F_{IN}$  [ $m^3s^{-1}$ ]); le débit de sortie ( $F_{OUT}$  [ $m^3s^{-1}$ ]) symbolise les perturbations.



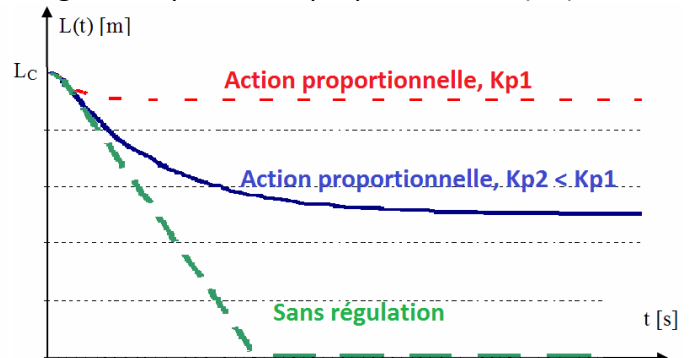
### Deux exemples d'évolution du niveau dans le cas d'une perturbation constante

Régulation tout ou rien (avec hystérésis)



En dessous de  $L_{Cmin}$  on fait tout ( $F_{IN} = F_{INmax}$ ).  
Au dessus de  $L_{Cmax}$  on fait rien ( $F_{IN} = 0$ ).

Régulation par action proportionnelle (AP)



Avec l'action proportionnelle ( $F_{IN} = K_p * \epsilon$ ), on tend vers un écart permanent car il faut une erreur pour avoir un débit d'entrée qui compense  $F_{OUT}$ .

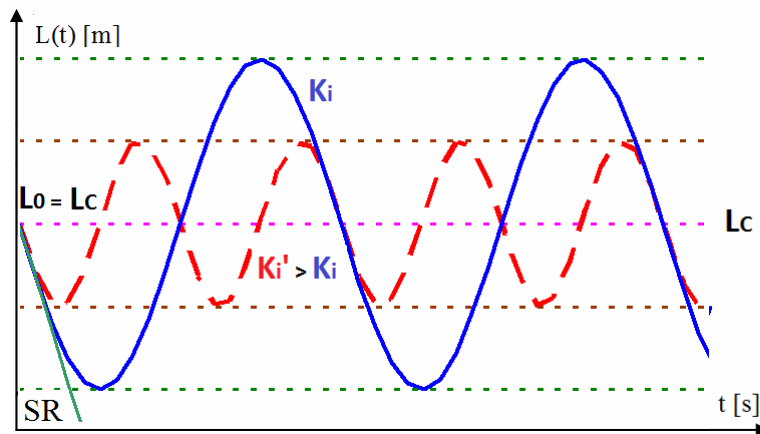
## La Régulation par action intégrale (AI)

Nous allons considérer ici une régulation par action intégrale uniquement. Nous verrons que cette technique entraîne un effet oscillatoire, ce pourquoi elle n'est jamais utilisée seule.

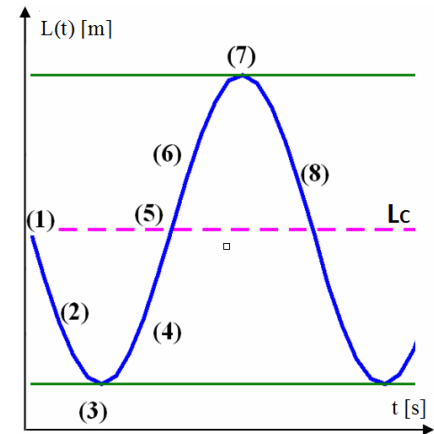
L'action de régulation a pour expression  $MV = AI = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$

### Problème de la cuve avec perturbation C<sup>TE</sup> : Grandeur réglée par AI

Influence du  $K_i$  sur l'évolution du niveau



Points spécifiques décrits ci-après



### Problème de la cuve avec perturbation C<sup>TE</sup> : Description des points ci-avant

(1)	Lorsque $t=0$ , le niveau $L(t)=L_c$ , c'est une condition de départ. À ce moment là, l'AI vaut 0 car on intègre sur un intervalle de temps nul, dans ce cas $F_R(t)=0$ et donc le niveau chute avec une pente de $-F_p/S$ (cf cas S.R.).
(2)	Ici on s'est écarté de la consigne pendant un certain temps donc l'intégrale entre 0 et cet instant de $L_c-L(t)$ est positif, ce qui correspond à une AI positive. Il y a donc $F_R(t)>0$ mais à cet instant $F_R(t)<F_p$ ce qui signifie que le niveau continue à descendre mais moins vite qu'au temps 0. À cet instant la vitesse de variation du niveau vaut $-(F_p - F_R(t))/S$ .
(3)	Ici, comme on a continué à s'écarter de $L_c$ , l'AI a continué à augmenter. L'AI a atteint une valeur telle que $F_R(t)=F_p$ , ce qui signifie qu'à cet instant précis le niveau ne varie plus mais il est néanmoins inférieur à $L_c$ .
(4)	Par rapport au point (3), l'AI a continué à augmenter car $L(t)$ est toujours inférieur à $L_c$ . Ce qui a entraîné $F_R(t)>F_p$ , ce qui se traduira bien par une augmentation de niveau.
(5)	Ici $L(t)=L_c$ mais nous sommes à l'instant où le niveau s'est écarté de la consigne pendant le plus de temps et donc où l'AI est maximale. Nous pourrions montrer qu'à cet instant $F_R(t)=2*F_p$ et donc la vitesse de variation du niveau vaut $F_p/S$ .
(6)	A partir du point (5), le niveau est passé au dessus du niveau de consigne, ce qui signifie que la valeur de l'AI tend à diminuer ; mais comme l'AI n'as pas diminué suffisamment, nous sommes toujours dans le cas où $F_R(t)>F_p$ et donc le niveau continue à monter (mais moins vite qu'au point (5) ).
(7)	Entre le point (6) et le point (7), le niveau est resté au dessus de $L_c$ et donc l'AI a continué à diminuer ; en fait ici l'AI a égalé la perturbation et donc $F_R(t)=F_p$ et le niveau n'augmente plus. Comme il n'y a pas encore eu une période entière, l'intégrale entre 0 et cet instant de $L_c-L(t)$ est toujours positif, ce qui correspond à une AI $>0$ .
(8)	Ici, nous nous approchons d'une période entière, et donc la valeur de l'AI est relativement faible, c'est la perturbation qui prend le dessus et le niveau chute. Enfin, lorsque une période entière se sera écoulée, l'AI sera nulle et le niveau chutera avec sa vitesse maximale $-F_p/S$ , nous revenons à la situation du point (1).

On remarque qu'avec l'AI, l'erreur maximale tend à diminuer lorsqu'on augmente  $K_i$  mais au prix d'une fréquence d'oscillation plus élevée. En pratique on combine souvent l'AI et l'AP.

## Le Régulateur PI (proportionnel et intégral)

Le régulateur PI donne une grandeur de réglage (MV) qui tient compte de l'erreur

(régulateur P) et de l'intégrale de l'erreur (régulateur I) :  $MV = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$

Les coefficients d'actions proportionnelles (AP) et intégrales (AI) sont respectivement  $K_p$  et  $K_i$ . Il faut être attentif avec les notations car parfois  $K_p$  fait référence à un paramètre du système physique (*Plant*). Pour lever l'ambiguïté, nous utiliserons simplement le symbole  $K$ .

L'action PI s'écrit alors :  $MV = AP + AI = Ke(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau = Ke(t) + \frac{K}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau$  où  $K_i = \frac{K}{T_i}$

On remarque que le paramètre  $K$  est le gain général du régulateur (apparaît au sein de  $K_i$ ).

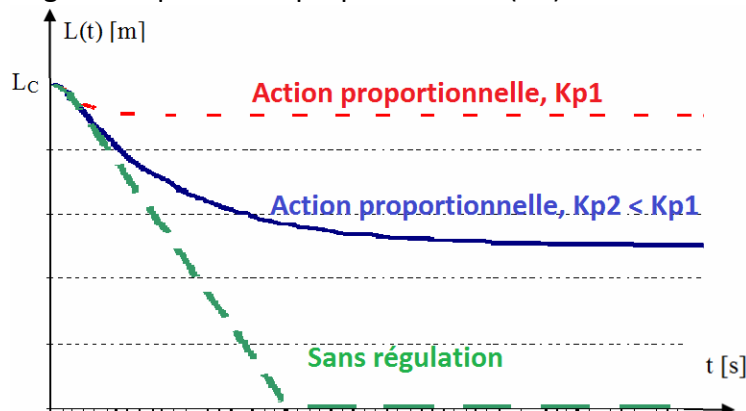
$T_i$  règle la contribution relative de l'action intégrale à l'action de régulation totale.

Pour augmenter l'action intégrale on diminue  $T_i$  ; pour la diminuer on augmente  $T_i$ .

On interprète  $T_i$  comme le temps tel que  $AI = AP$  dans le cas d'une erreur constante.

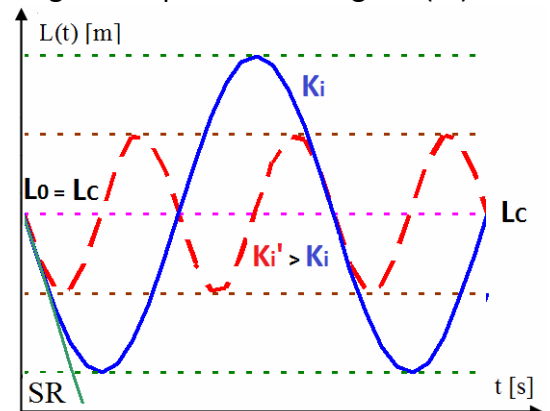
### Problème de la cuve avec perturbation $C^{TE}$ : Grandeur réglée par AP et AI séparées

Régulation par action proportionnelle (AP)



L'AP ne permet pas de revenir à la consigne ici.

Régulation par action intégrale (AI)

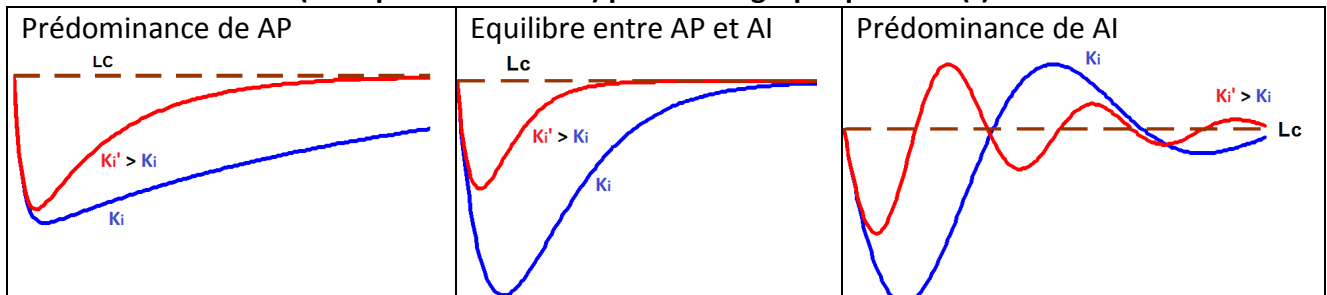


L'AI fait apparaître une oscillation.

On combinera l'AP et l'AI en essayant souvent de maintenir un bon équilibre entre les deux.

Si AI prédomine, l'oscillation est prononcée. Si AP prédomine, on exploite moins l'intégrale.

### Problème de la cuve (avec perturbation $C^{TE}$ ) par AP&I : graphiques de L(t)



Pour avoir l'équilibre entre AI et AP, il faut tenir compte du système physique (*Plant*). Dans notre cas l'équilibre est obtenu lorsque  $K \cdot T_i = 4S$ , ce qui donne un lien (identique ici au IMC Tuning) entre les paramètres  $K$  et  $T_i$ . Il nous reste une liberté de réglage des paramètres PI.

## L'utilisation de Laplace en régulation

Nous avons vu que la décomposition de Fourier d'un signal périodique permettait de passer du domaine temporel au domaine fréquentiel. Ainsi, une fonction périodique  $f(t)$  peut être représentée dans le domaine fréquentiel comme une expression complexe  $F(\omega)$ .

On représente l'aspect spectral du signal par son module et son argument en fonction de  $\omega$ . La représentation spectrale, discrète pour un signal périodique, devient continue pour un signal non périodique (cas de  $T$  qui tend vers l'infini).

Nous avons manipulé des représentations spectrales continues lors de l'étude des filtres. Les diagrammes de Bode permettaient de se représenter, du point de vue spectral, le traitement que subit une composante du signal en passant dans le filtre. Par exemple, nous avons vu qu'en multipliant (ou divisant) par  $j\omega$ , on dérive (ou intègre) le signal.

De manière similaire à la transformation de Fourier, on peut définir la transformation de Laplace qui permet de passer une fonction du domaine temporel  $f(t)$  à une fonction  $F(p)$  dans un autre domaine. La variable de Laplace (notée  $p$  ou  $s$ ) est un nombre complexe. Ce qui est très pratique avec Laplace est qu'une dérivée dans le domaine temporel se traduit par une simple multiplication par  $s$  dans le domaine de Laplace. Une intégrale quant à elle se traduira par une simple division par  $s$ .

Laplace est fort utilisé en régulation et repose sur des notions mathématiques qui s'avèrent très utiles dans la pratique. Ces notions sont bien développées lorsqu'on fait des études supérieures dans le domaine.

SITUATION D'APPRENTISSAGE 14	Fiche de description
<b>Illustration d'un cahier des charges par un Grafcet et représentations schématiques liées à la régulation</b>	
<b>Description</b>	
Sur base du dossier technique du robot qu'on vous a fourni, vous devez représenter : <ul style="list-style-type: none"><li>- Un schéma reprenant les grandeurs liées à la régulation de vitesse des roues du robot</li><li>- Un Grafcet traduisant le cahier des charges d'un programme simple de démo</li></ul>	
<b>Cahier des charges</b> ... à définir en classe ...	
1.)  2.)  3.)  4.)  5.)  6.)  7.)	

**Base de planification jusqu'à la situation d'apprentissage 15**

L'idée est ici de regrouper au sein d'une situation nouvelle et personnalisée un ensemble de notions liées au cours de robotique.

Certaines notions qui n'ont pas été vues au cours peuvent très bien faire l'objet d'une étude et d'une mise en pratique.

**Planification prévisionnelle jusqu'à la situation d'apprentissage 15**

Semaine	Jour	Jour	Jour
	Situation d'apprentissage 15		

Compléter le planning prévisionnel en classe

<b>SITUATION D'APPRENTISSAGE 15</b>	Fiche de description
<b>Etude et mise en oeuvre personnalisée liée au cours de Robotique</b>	
<b>Description</b>	... à définir en classe ...
<b>Cahier des charges</b>	... à définir en classe ...
1.)  2.)  3.)  4.)  5.)  6.)  7.)	

## Table des matières

<b>Partie S&amp;T</b>	Machines opératrices	p. 3
<b>Partie S&amp;T</b>	Frottements, débit et pression dans une installation	p. 4
<b>Partie S&amp;T</b>	Exemple d'installation de pompage	p. 5
<b>Partie S&amp;T</b>	Installation opératrice : Exercices	p. 6
<b>Partie S&amp;T</b>	Production de l'air comprimé	p. 7
<b>Partie S&amp;T</b>	Exemples d'utilisation de l'air comprimé	p. 8
<b>Partie S&amp;T</b>	Mesures et contrôles dans une installation pneumatique	p. 9
<b>Situation d'apprentissage 9 :</b>		p. 10
<b>Etude d'une installation opératrice hydraulique et d'une exploitation d'air comprimé.</b>		→
		p. 12
<b>Partie Eo</b>	Décomposition en série de Fourier	p. 14
<b>Partie Eo</b>	L'impédance	p. 15
<b>Partie Eo</b>	Série de Fourier / impédance : Exercices	p. 16
<b>Partie Eo</b>	Les effets capacitifs et inductifs	p. 17
<b>Partie Eo</b>	Les effets capacitifs et inductifs : Exercices	p. 18
<b>Partie Eo</b>	L'impédance du condensateur et de la bobine	p. 19
<b>Situation d'apprentissage 10 :</b>		p. 20
<b>Etude de signaux électriques par les impédances et la série de Fourier.</b>		→
		p. 22
<b>Partie Eo</b>	Fonction de transfert d'un filtre	p. 24
<b>Partie Eo</b>	Diagrammes de Bode d'un filtre du premier ordre	p. 25
<b>Partie Eo</b>	Exercices sur les filtres	p. 26
<b>Partie Eo</b>	L'ampli opérationnel idéal et le montage suiveur	p. 27
<b>Partie Eo</b>	Manipulation sur le montage suiveur	p. 28
<b>Partie Eo</b>	Le montage non-inverseur	p. 29
<b>Partie Eo</b>	Alimentation symétrique : Inverseur et sommateur-inverseur	p. 30
<b>Partie Eo</b>	Alimentation asymétrique d'un montage inverseur	p. 31
<b>Partie Eo</b>	Filtres à amplificateur opérationnel	p. 32
<b>Partie Eo</b>	Exercices sur les AOP	p. 33
<b>Situation d'apprentissage 11 :</b>		p. 34
<b>Etude de montages à amplificateurs opérationnels.</b>		→
		p. 36
<b>Partie Eo</b>	Le transformateur	p. 38
<b>Partie Eo</b>	Le redressement et le filtrage d'une alimentation DC	p. 39
<b>Partie Eo</b>	La régulation linéaire d'une alimentation DC	p. 40
<b>Partie Eo</b>	Le régulateur à découpage	p. 41
<b>Partie Eo</b>	Exercices sur l'alimentation DC	p. 42
<b>Partie Eo</b>	Les accumulateurs	p. 43
<b>Situation d'apprentissage 12 :</b>		p. 44
<b>Modification d'un circuit d'alimentation pour fonctionner également sur batterie.</b>		→
		p. 45

<b>Situation d'apprentissage 13 :</b>		
<b>Recherche et développement d'un prototype de robot commandé par API</b>		p. 47
<b>Partie Eo</b>	Le principe du pont en H	p. 48
<b>Partie Eo</b>	Constitution d'un signal analogique en intégrant le PWM	p. 49
<b>Partie Eo</b>	Etude du circuit d'interface des moteurs	p. 50
<b>Partie Eo</b>	Soudure de la carte moteur - partie 1	p. 51
<b>Partie Eo</b>	Soudure de la carte moteur - partie 2	p. 52
<b>Partie Eo</b>	Assemblage du robot	p. 53
<b>Partie AUT</b>	Notion de base du Grafcet	p. 55
<b>Partie AUT</b>	Exercices de programmation Grafcet	p. 56
<b>Partie AUT</b>	Le langage SFC	p. 57
<b>Partie S&amp;T</b>	Introduction à la régulation	p. 58
<b>Partie S&amp;T</b>	Régulation simple en boucle fermée	p. 59
<b>Partie S&amp;T</b>	La régulation par action intégrale	p. 60
<b>Partie S&amp;T</b>	Le régulateur PI	p. 61
<b>Partie S&amp;T</b>	L'utilisation de Laplace en régulation	p. 62
<b>Situation d'apprentissage 14 :</b>		
<b>Illustration d'un cahier des charges par un Grafcet et représentations schématiques liées à la régulation.</b>		p. 63
<b>Situation d'apprentissage 15 :</b>		
<b>Situation nouvelle et personnalisée</b>		p. 65
Exemples de notions non vues à intégrer :		
<b>Partie S&amp;T</b>	Régulateur de vitesse	
<b>Partie S&amp;T</b>	Stabilité des régulateurs	
<b>Partie S&amp;T</b>	Principe physique des servomoteurs	
<b>Partie S&amp;T</b>	Les servovalves	
<b>Partie S&amp;T</b>	Les vannes de régulations	
<b>Partie S&amp;T</b>	Capteur de température et d'humidité	
<b>Partie Eo</b>	La photodiode et son utilisation	
<b>Partie Eo</b>	Les optocoupleurs	
<b>Partie Eo</b>	Le thyristor et sa commande	
<b>Partie Eo</b>	Le triac et sa commande	
<b>Partie Eo</b>	Le variateur de vitesse	
<b>Partie AUT</b>	Les bus de communication industriels	
<b>Partie AUT</b>	Notions algorithmiques	