

Station de Mesure et de contrôle de la qualité de l'air

I. PRESENTATION DU SYSTEME : MESURE ET CONTROLE DE LA QUALITE DE L'AIR



I-1. Cadre institutionnel de la surveillance de la qualité de l'air

Le Ministère de l'Environnement et du développement durable a la charge d'élaboration de la stratégie nationale de surveillance, de prévention et de lutte contre la pollution de l'air. Il élabore la législation et développe le cadre institutionnel, en établissant des partenariats avec l'ensemble des opérateurs concernés. Le Ministère a initié un programme visant le renforcement des capacités et la formation d'experts dans les domaines du contrôle et de l'évaluation des impacts sur l'environnement et sur la santé publique.

L'Agence Nationale de Protection de l'Environnement (ANPE) dispose d'un réseau de stations fixes implantées dans les grands pôles urbains lui permettant de surveiller en continu, la qualité de l'air. Un programme d'extension de ce réseau national va permettre de doter la Tunisie d'un outil de suivi régulier et de prévision à court terme de la qualité de l'air ambiant.

Le Centre International des Technologies de l'Environnement de Tunis (CITET) joue le rôle de prestataire de services en matière d'expertise, de conseil, d'analyse et d'élaboration de procédures de contrôle de la qualité de l'air ambiant et à l'émission. Les moyens techniques et le savoir faire du CITET constituent un outil de référence national en matière de contrôle et de suivi de la qualité de l'air.

Le CITET peut, moyennant des conventions d'assistance technique, aider les industriels à se doter d'un système d'auto-contrôle déclaratif pour répondre aux normes.

I-2. Situation actuelle

La qualité de l'air en Tunisie est qualifiée, jusqu'à présent, d'assez bonne dans son ensemble. Des situations critiques peuvent apparaître de temps en temps sous des conditions climatiques particulières, au niveau des grands croisements routiers et dans certaines zones situées à proximité d'industries polluantes (Tunis, Sfax, Gabès, Bizerte). Ce changement progressif de la situation a conduit à une prise de conscience du public et des autorités locales et nationales.

C'est ainsi qu'une réglementation et une normalisation appropriées ont été élaborées et la législation continue d'évoluer pour toucher plusieurs domaines comme le trafic automobile et les secteurs industriels.

I-3. Contribution du programme national de suivi de la qualité de l'air

Le dispositif de surveillance vise principalement la protection de la santé publique et de l'environnement. Il assure les principales fonctions suivantes :

- Le suivi spatio-temporel de la pollution atmosphérique ;

- La mise en place de procédures d'assurance qualité pour garantir la fiabilité de l'ensemble des chaînes de mesure ;
- La prévision et prévention des épisodes aigus ou subaigus ;
- L'information des autorités locales, nationales et du public ;
- La participation à l'effort national et international de protection de l'atmosphère.

Pour soutenir ce programme, le Ministère de l'Environnement et du développement durable a pris un certain nombre de mesures et mis en place des moyens parmi lesquels on peut citer :

- L'élaboration d'un cadre institutionnel et juridique adéquat ;
- La création d'une structure et des comités sectoriels pour le suivi et la mise en œuvre des accords et engagements de la Tunisie à l'échelle régionale et internationale (conventions et protocoles relatifs aux changements climatiques et à la couche d'ozone) ;
- L'assistance financière (FODEP) et technique (CITET) pour la lutte contre les émissions polluantes ;
- Le renforcement des capacités et la formation des spécialistes dans le domaine de la pollution atmosphérique ;
- La création du réseau national de suivi de la qualité de l'air ambiant avec 25 stations fixes à l'horizon 2006 dans les gouvernorats de Tunis, Sfax, Gabès, Bizerte, Sousse, Gafsa et Kairouan; pour définir qualitativement et quantitativement la qualité de l'air ambiant et fournir une information continue et régulière tout en suivant l'évolution des indicateurs établis à cet effet ;
- La création d'un laboratoire de référence spécialisé doté des moyens humains et matériels appropriés et en fournissant une assistance technique aux industriels pour atteindre les objectifs de qualité requis par les normes.

I-4. Indicateurs de la qualité de l'air

Plusieurs indicateurs et paramètres peuvent être identifiés et gagnent à être suivis pour évaluer la qualité de l'air en tenant compte du contexte socioéconomique local. Ces indicateurs pourraient être les suivants :

- Teneur en SO₂, CO₂ et en plomb ;
- Les oxydes d'azote et les poussières ;
- Les quantités de carburants selon leur nature ;
- La teneur en plomb de l'essence ;
- Le taux de soufre dans le gasoil ;
- La densité de la circulation.

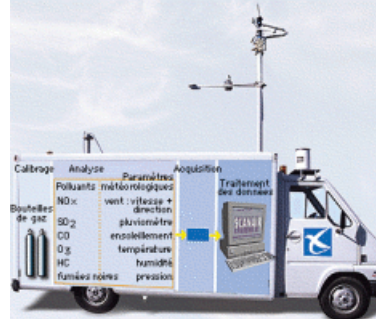
I-5. Les camions laboratoires

Le camion laboratoire contient les analyseurs qui vont permettre une analyse automatique et continue de la qualité de l'air au travers de la mesure de divers polluants. La tête de prélèvement d'air est placée sur le toit du véhicule. Un tel laboratoire permet d'effectuer des analyses sur différents sites.

La mise en place d'un camion laboratoire génère quelques contraintes techniques à prendre en compte :

- L'emplacement minimal nécessaire si possible dans une enceinte sécurisée ;

- La nécessité d'alimentation électrique ;
- La zone plane et stable : cette condition est d'autant plus importante que le mât météorologique est déployé ;
- La communication via une ligne téléphonique RTC indépendante ou par un téléphone GSM pour les cas difficiles.



Pour assurer une surveillance et informer la population en matière de qualité de l'air, une échelle indiquant la concentration des principaux polluants que l'on rencontre dans l'atmosphère (dioxyde de soufre, dioxyde d'azote, poussière et ozone) doit être créée.

Dans ce contexte, on se propose d'étudier une station de mesure "mobile" dont le schéma de principe est donné par la figure 1, installée dans une camionnette non polluante qui se charge de prélever un échantillon d'air, de mesurer la concentration du polluant et de transmettre ces informations à distance vers un poste central.

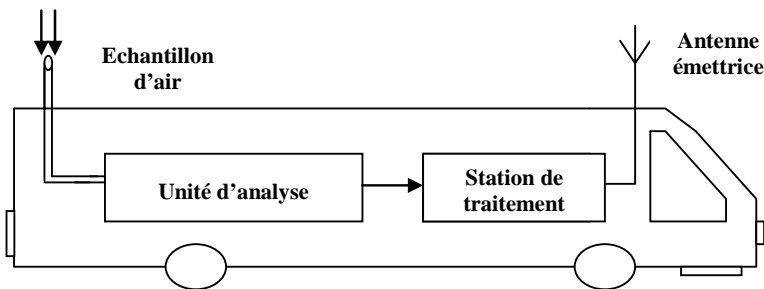


Figure 1 : Station mobile de mesure de la qualité de l'air

Le schéma synoptique de la carte de mesure et de contrôle de la qualité de l'air est donné par la figure 2.

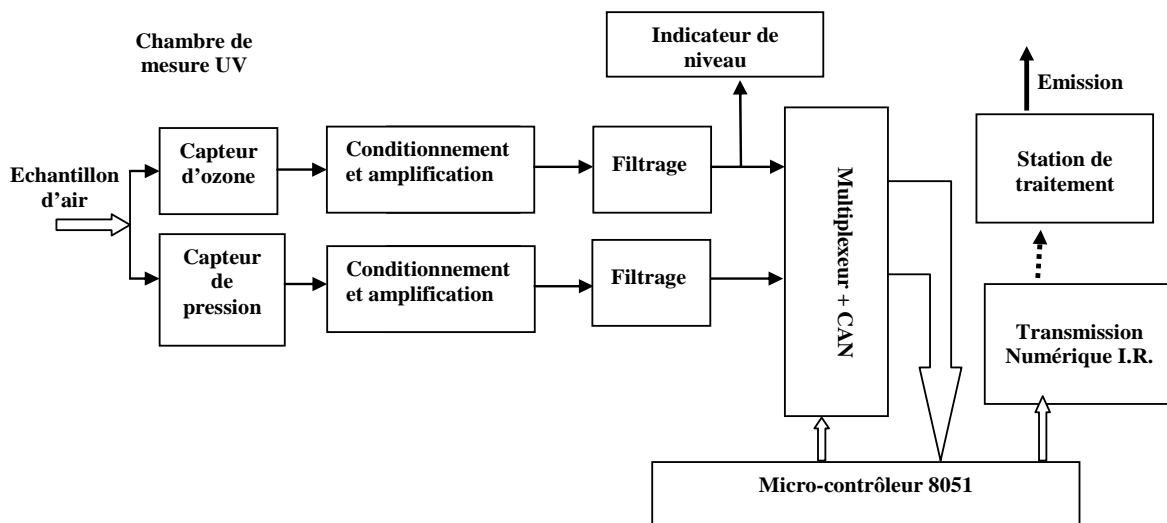


Figure 2 : Schéma synoptique du système mesure et contrôle de la qualité de l'air

II. ETUDE DE LA CHAINE D'ACQUISITION

A. Chaîne de mesure d'ozone

L'indice ATMO (tableau 1) est un indicateur de la qualité de l'air qui repose sur la concentration de 4 polluants (dioxyde d'azote, particules de diamètre inférieur à 10 µm, ozone, dioxyde de soufre). Cet indice permet de disposer d'une information synthétique sur la pollution atmosphérique urbaine. Les agglomérations sont repérées par une couleur en fonction de la qualité de l'air estimé :

- Excellente à assez bonne : Vert ;
- Moyenne à très médiocre : Orange ;
- Mauvaise à exécration : Rouge;

| | INDICE | SEUILS POUR L'OZONE (c en µg / m ³) | |
|---------------|--------|---|--|
| Exécration | 10 | > 360 | SEUIL D'ALERTE |
| Très mauvaise | 9 | 251 à 360 | |
| Mauvaise | 8 | 181 à 250 | SEUIL DE RECOMMANDATIONS ET D'INFORMATION |
| Très médiocre | 7 | 146 à 180 | |
| Médiocre | 6 | 111 à 145 | |
| Moyenne | 5 | 91 à 110 | |
| Assez bonne | 4 | 71 à 90 | |
| Bonne | 3 | 51 à 70 | |
| Très bonne | 2 | 31 à 50 | |
| Excellente | 1 | 0 à 30 | |

Tableau 1 : Seuils pour l'ozone

L'étude porte sur un dispositif de mesure de la concentration du polluant ozone et de l'affichage du niveau de pollution basé sur trois couleurs. Le système se décompose comme le montre le schéma bloc de la figure 3.

Dans cette partie tous les amplificateurs opérationnels sont parfaits et alimentés par des tensions considérées constantes $+V_{cc}= 15 V$ et $-V_{cc}=-15 V$. Leurs tensions de saturation à la sortie : $+V_{sat} = +V_{cc}$ et $-V_{sat} = -V_{cc}$.

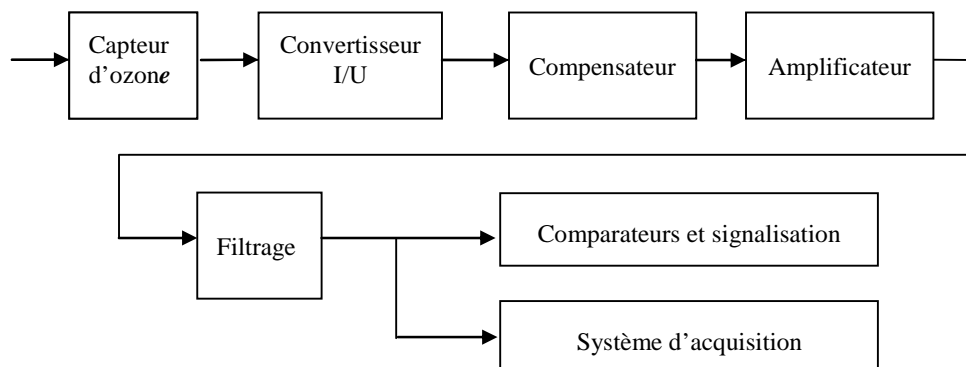


Figure 3 : Schéma bloc de la chaîne du traitement analogique du signal issu du capteur d'ozone

A1. Capteur d'ozone

Le capteur d'ozone est formé d'une photodiode sensible aux rayonnements ultraviolets et polarisée en inverse. Elle peut être modélisée par une source de courant idéale I qui est une fonction affine de la concentration d'ozone c suivant la loi : $I = I_0(1 - 10^{-4} \cdot c)$.

Avec $I_0 = 100 \mu\text{A}$: Intensité du courant lorsque l'air ne contient aucune molécules d'ozone ;
et c : concentration d'ozone en $\mu\text{g m}^{-3}$.

A1-1. Déterminer les valeurs de l'intensité I pour les concentrations $c = c_0 = 0$ et $c = 360 \mu\text{g m}^{-3}$.

Mise en forme :

L'information issue du capteur d'ozone est mise en forme par le montage de la figure 4.

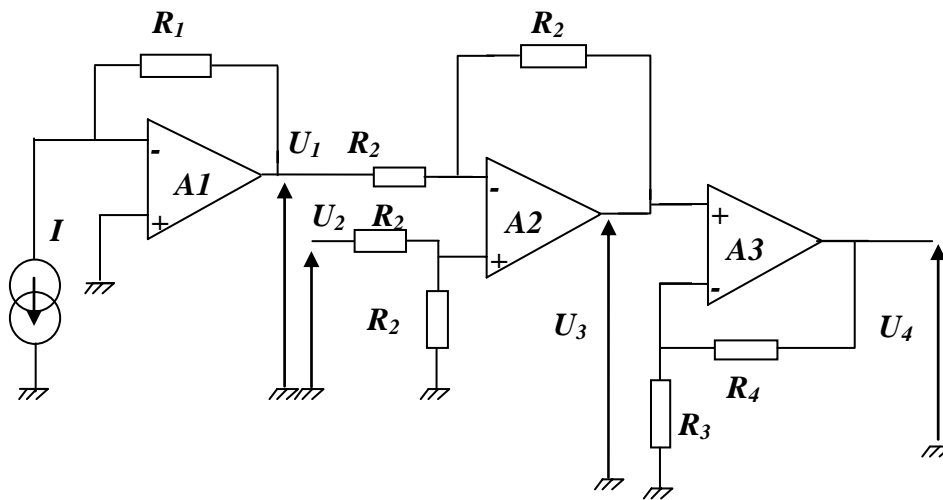


Figure 4 : Montage de conditionnement

U_2 est une tension de référence interne au montage.

A1-2. Montrer que la tension U_1 peut s'écrire sous la forme $U_1 = -a c + U_0$.

A1-3. Quel est le régime de fonctionnement de l'A.O A_2 ? Justifier votre réponse.

A1-4. Déterminer l'expression de U_3 en fonction de U_2 et U_1 .

A1-5. On donne $U_2 = 10 \text{ V}$. Montrer que U_3 peut se mettre sous la forme $U_3 = k c$. Quelle est la valeur de k ; préciser son unité.

A1-6. Exprimer la tension U_4 en fonction des résistances R_3 et R_4 et de la tension U_3 .

On donne $R_3 = 4,7 \text{ k}\Omega$. On souhaite obtenir une tension $U_4 = 1,8 \text{ V}$ lorsque la concentration maximale en ozone est $c_{\text{max}} = 360 \mu\text{g m}^{-3}$.

A1-7. Calculer la résistance R_4 .

A1-8. Tracer (Document DR1) l'allure de la tension U_4 en fonction de la concentration d'ozone c . Faire apparaître les points correspondant à $c = 90 \mu\text{g m}^{-3}$ et $180 \mu\text{g m}^{-3}$.

A2. Filtrage analogique

Afin d'éliminer l'effet de bruit on intercale à la sortie de l'étage amplificateur un filtre actif à contre réaction multiple ayant la structure de Rauch. Le montage électronique est donné par la figure 5. On donne $R = 50\text{K}\Omega$ et $C = 100\text{nF}$.

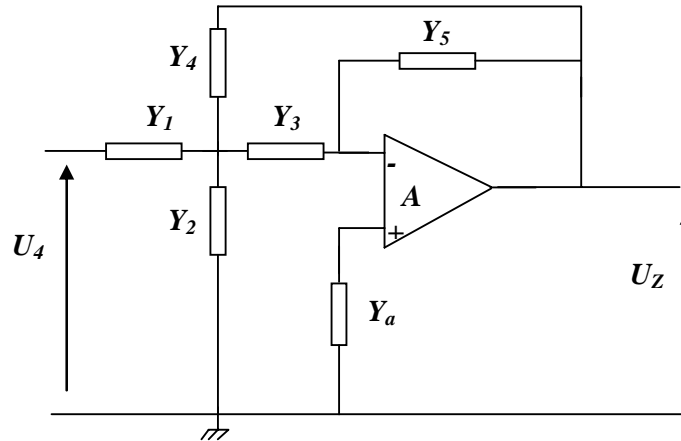


Figure 5 : Filtre à structure de Rauch

A2-1. Montrer que la fonction de transfert complexe s'écrit sous la forme.

$$T = \frac{U_z}{U_4} = \frac{-Y_1 Y_3}{Y_5 (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) + Y_3 Y_4}$$

A2-2. Dans le cas où $Y_1 = Y_3 = Y_4 = Y_a = 1/R$, $Y_2 = Y_5 = jC\omega$, Donner la fonction de transfert complexe $T(j\omega)$.

A2-3. Tracer dans le plan de Bode les allures de $T(j\omega)$: $T_{dB} = f(\omega)$ et $\arg(T(j\omega)) = f(\omega)$; utiliser le papier semi-log de la feuille de réponse (DR2).

A2-3. Déduire la nature de ce filtre, sa fréquence de coupure et sa bande passante.

A3 : Dispositif de signalisation

Ce dispositif est destiné à visualiser les zones correspondant aux trois niveaux de qualité de l'air : excellente, moyenne à très médiocre, mauvaise à exécrable (tableau 2).

| Qualité de l'air | c ($\mu\text{g m}^{-3}$) | Signalisation lumineuse |
|--------------------------|------------------------------|-------------------------|
| Excellente à assez bonne | 0 à 90 | Verte |
| Moyenne à très médiocre | 91 à 180 | Orange |
| Mauvaise à exécrable | $c > 180$ | Rouge |

Tableau 2

La signalisation est assurée par trois diodes électroluminescentes (Del_1 , Del_2 , Del_3) de couleur : Verte, Orange et Rouge. Le schéma électronique de la figure 6 est utilisé pour visualiser approximativement la qualité de l'air.

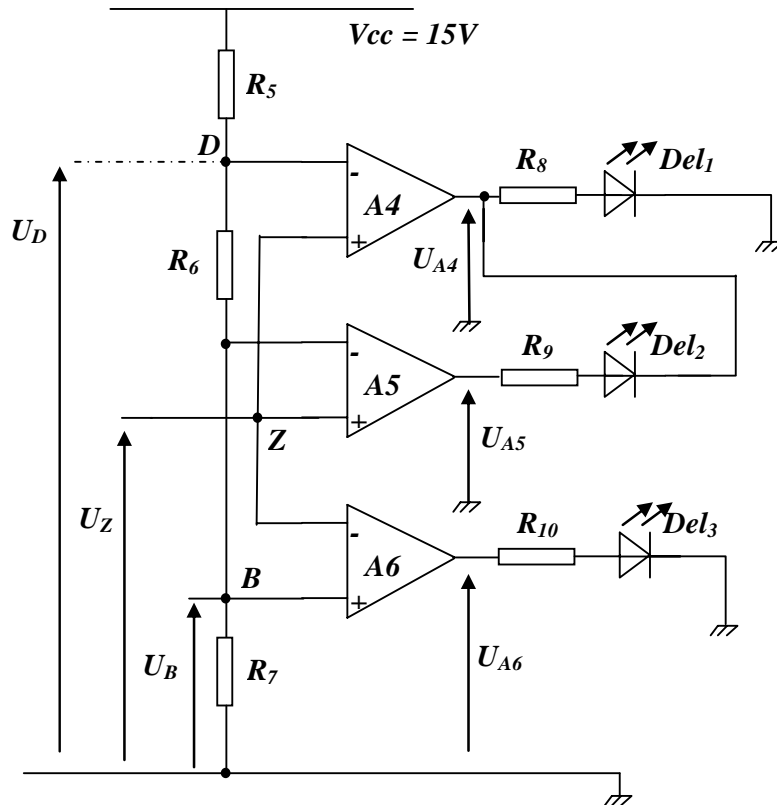


Figure 6 : Montage de visualisation de la qualité de l'air

La tension U_Z de l'étage précédent est comparée à deux tensions de seuil U_D et U_B . Les tensions de seuil sont élaborées par l'ensemble des résistances R_5 , R_6 et R_7 .

$R_6 = R_7 = 4,7 \text{ k}\Omega$, R_5 est à déterminer. On désire obtenir une tension $U_D = 0,9 \text{ V}$.

A3-1. Calculer la valeur de R_5 , en déduire la tension U_B .

A3-2. Déterminer les valeurs des tensions de sorties U_{A4} , U_{A5} et U_{A6} dans les différentes conditions du tableau ci-dessus (Tableau2).

A3-3. Déterminer l'état des trois diodes électroluminescentes Del_1 , Del_2 et Del_3 en fonction des tensions de sorties U_{A4} , U_{A5} et U_{A6} . En déduire la couleur à utiliser pour chacune de ces diodes.

A4. Conversion Analogique-Numérique

Dans la plage de mesure étudiée, la tension U_Z est proportionnelle à la concentration d'ozone dans l'air:

$$U_Z = 5 \times 10^{-3} c.$$

Cette tension U_Z , image de la concentration d'ozone, est appliquée à l'entrée du convertisseur analogique-numérique dont la sortie peut être traduite par un nombre décimal N_d .

A4-1. Les seuils de concentration d'ozone sont donnés à $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ près, soit $\Delta c = 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Calculer la variation ΔU_Z (exprimée en mV) correspondant à une variation élémentaire Δc de la concentration d'ozone dans l'air.

A4-2. La résolution de ce convertisseur est donnée par la relation : $q = \frac{U_M}{2^n - 1}$

Dans cette formule, on désigne par :

- U_M : la valeur maximale de la tension U_z correspondant à $c = 500 \mu\text{g}/\text{m}^3$;
- q : le quantum ou résolution, correspondant à la plus petite variation de la tension U_z qui permet d'incrémenter de 1 la sortie numérique ;
- n : le nombre de bits.

A4-2.1. Calculer alors le nombre minimum n de bits que devra avoir ce convertisseur.

A4-2.2. En déduire la valeur numérique de q .

A4-3. Le nombre N_d à la sortie du convertisseur est donné par la relation : $N_d = \frac{U_z}{q}$

A4-3.1. Exprimer N_d en fonction de c .

A4-3.2. Calculer le nombre N_d que fournira le convertisseur si l'on atteint le "Seuil d'Alerte".

B. Capteur de pression

Le capteur utilisé est basé sur une jauge de contrainte dont le support se déforme sous l'effet de la pression atmosphérique. On étudie dans cette première partie le principe d'une jauge de contrainte.

B1. Etude d'une jauge de contrainte

On s'intéresse dans cette partie à la mesure de la déformation par jauge de contrainte. La jauge, destinée à la mesure des variations de longueur, constitue la résistance R_3 du « Pont de Wheatstone » représenté sur la figure 7.

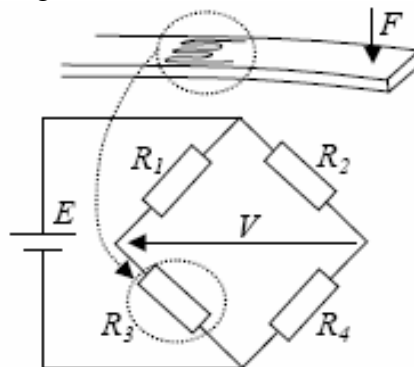


Figure 7 : Pont de Wheatstone.

- B1-1.** Rappeler brièvement ce que sont les « jauges de contrainte » et à quels types de mesures elles sont associées ?
- B1-2.** Calculer l'expression littérale de la tension V en fonction de E , R_1 , R_2 , R_3 et R_4 .
- B1-3.** Lorsque la membrane sensible à la pression est sous contrainte, une différence de longueur Δl implique une différence de résistance ΔR de la jauge. *Quelle est alors l'expression littérale de la sensibilité de la résistance à la contrainte ?*
- B1-4.** Donner l'expression littérale de la différence de tension ΔV qu'implique la différence de résistance ΔR , en considérant que $R_1=R_2=R_4=R$ et $R_3 = R+\Delta R$.
- B1-5.** *Quelle est l'expression littérale de la sensibilité de cette tension à la variation de résistance ?*
- B1-6.** On suppose à présent que la valeur de la résistance R_3 est affectée à la fois par la déformation et par la température. En considérant alors que $\Delta R = \Delta R_l + \Delta R_T$ (ΔR_T étant la contribution de la température et ΔR_l celle de la déformation), *est il possible d'en extraire la mesure de la déformation seule ?*
- B1-7.** Une méthode particulière permettant d'assurer l'immunité aux variations de température consiste à ajouter une jauge identique en position perpendiculaire à la contrainte et d'inclure cette résistance dans le pont. *Faire un dessin représentant la disposition de la deuxième jauge. Quelle résistance faut-il alors remplacer ?*
- B1-8.** En considérant que la deuxième jauge ne varie qu'à cause de la température, d'une valeur ΔR_T , *calculer l'expression littérale de la différence de tension ΔV .*

B2. Etude du capteur MPX 2200

Le capteur de pression est l'un de la série MPX2200 de chez MOTOROLA (Annexe 1). Ils sont prévus pour mesurer une pression de 0 à 2 bars (200kPa) mais ils sont protégés jusqu'à 4 bars. Basés sur une jauge de contrainte dont le support se déforme sous l'effet de la pression atmosphérique, ils délivrent lorsqu'ils sont parcourus par un courant, une tension proportionnelle à la pression relative.

Cette tension U_s , entre deux fils de sortie, n'est pas référencée par rapport à la masse et il faut donc utiliser un amplificateur différentiel pour effectuer les mesures sans perturbation.

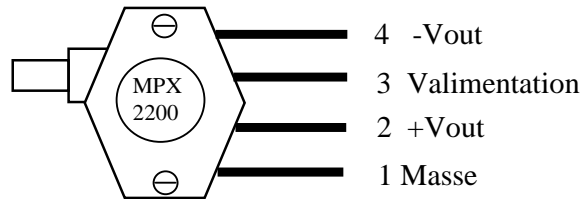


Figure 8 : Brochage du capteur MPX2200

Basé sur le principe d'un pont avec jauges de contraintes, il comporte en plus des thermistances et résistances ajustées au laser. Il est donc calibré et compensé en température entre 0° et 85°C.

B2-1. Quelles sont les deux versions du modèle MPX2200? Quel est le modèle à choisir si on veut contrôler la pression atmosphérique ?

B2-2. Déterminer la sensibilité de ce capteur.

B3. Conditionnement du signal par amplificateurs d'instrumentation

La tension de sortie, différentielle, est très sensible aux perturbations. Il faut éviter de la mesurer directement mais l'envoyer sur un amplificateur différentiel d'impédance d'entrée très grande permettant une amplification ainsi qu'une sortie référencée à la masse (les éventuelles perturbations se répercutent sur les deux entrées et se neutralisent).

Dans cette partie, on se propose de choisir la structure de l'amplificateur à monter à la sortie du capteur de pression.

On considère tout d'abord la structure de l'amplificateur différentiel de la figure 9, où

$$U_S = A_+ U_{E+} - A_- U_{E-}$$

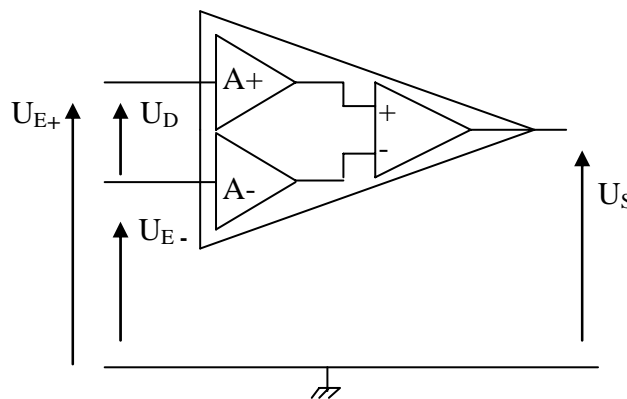


Figure 9 : Principe de l'amplificateur de différence

B3-1. Dans le cas pratique où les deux entrées ne sont pas parfaitement symétriques :

B3-1.1. Exprimer U_S en fonction de U_{E+} , U_{E-} et les amplifications : différentiel A_D et de mode commun A_C .

B3-1.2. Pour déterminer les caractéristiques de cet amplificateur, nous avons effectué les essais suivants:

- En appliquant $U_{E+} = 490\text{mV}$ et $U_{E-} = 510\text{mV}$, on trouve $U_S = -175\text{mV}$.
- En appliquant $U_{E+} = U_{E-} = 500\text{mV}$, on trouve $U_S = 25\text{mV}$.

Calculer le taux de rejection de mode commun CMRR (Common Mode Rejection Ratio) de cet amplificateur.

B3-2. On considère l'amplificateur différentiel suivant (Figure 10).

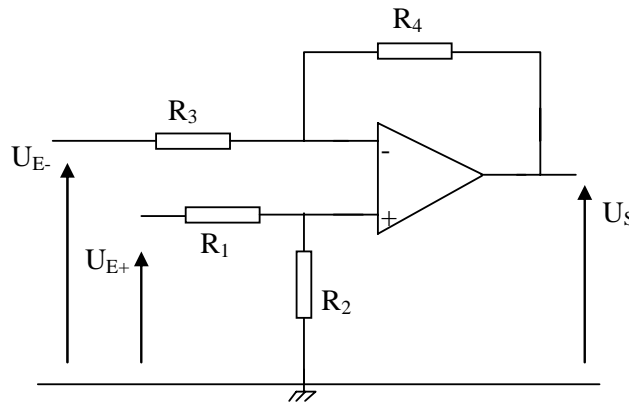


Figure 10 : Amplificateur différentiel

B3-2.1. En supposant que l'amplificateur est idéal, exprimer U_S en fonction des résistances du montage, U_{E+} et U_{E-} . En déduire l'expression des amplifications : différentiel A_D et de mode commun A_C .

B3-2.2. Dans le cas où $R_2=R_4$ et $R_1=R_3$, déterminer l'expression de U_S .

A.N. $R_3 = 1\text{ k}\Omega$; $R_4 = 100\text{ k}\Omega$. Calculer A_D , A_C et le CMRR.

B3-2.3. En réalité, à cause des tolérances, les résistances ne sont pas rigoureusement égales et $A_C \neq 0$. Si : $R_1 = R_3(1 + \varepsilon)$ avec $|\varepsilon| \ll 1$ et $R_2 = R_4$.

Montrer que :

$$A_C \approx -\varepsilon \frac{A_D}{1 + A_D}$$

En déduire le CMRR de cet amplificateur et calculer sa valeur dans le cas où $R_2 = R_3 = R_4 = 10\text{ k}\Omega$ et $R_1 = 10.5\text{ k}\Omega$

B3-3. On pense utiliser l'amplificateur d'instrumentation INA106 du fabricant Burr-Brown, dont le schéma de principe est donné par la figure 11.a et ayant comme CMRR=100dB (Annexe 2).

B3-3.1. Calculer le coefficient d'amplification différentiel A_D .

B3-3.2. Afin de voir l'influence de l'impédance de la source d'entrée, nous considérons l'amplificateur d'instrumentation INA106. On suppose que l'impédance de la source est égale à 5Ω sur l'entrée V_3 , comme l'indique la figure 11.b et en exploitant la relation à montrer en B3-2.3, calculer la nouvelle valeur de CMRR de ce montage. Que peut on conclure ?

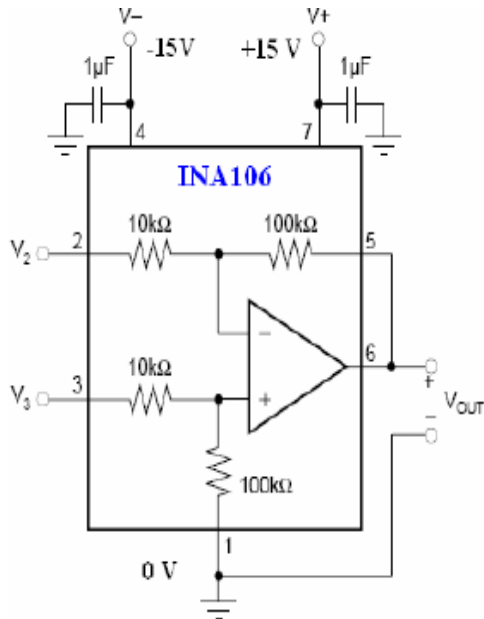


Figure 11.a

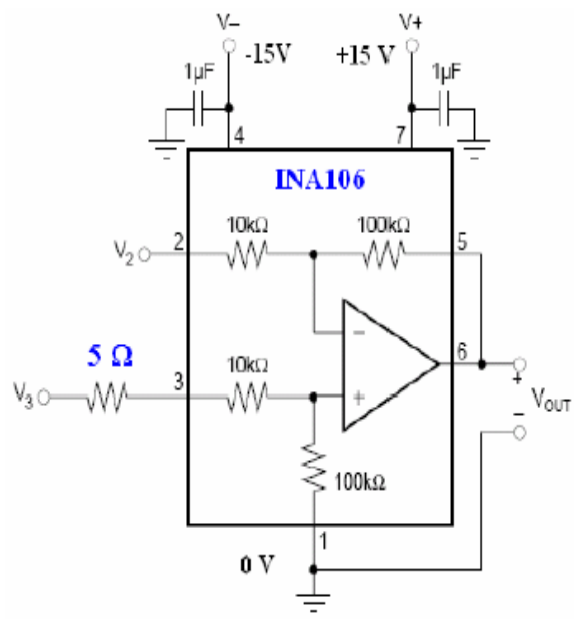


Figure 11.b

B3-4. On considère la structure à trois amplificateurs opérationnels (figure 12).

B3-4.1. Déterminer les expressions de U_{A1S} et U_{A2S} , sorties respectives de A1 et A2. En déduire la tension différentielle $U_{A2S} - U_{A1S}$ en fonction de R , R' , R_G et la tension $(U_{E+} - U_{E-})$.

B3-4.2. En s'intéressant à l'étage de sortie de A3, exprimer U_S en fonction de U_{A2S} , U_{A1S} et les résistances du montage. Quelle condition doit-on vérifier pour que $U_S = K (U_{E+} - U_{E-})$? Donner l'expression de K .

B3-4.3. Dans le cas où $R=R'$, $R_2= R_4$ et $R_1= R_3$, déduire l'expression de l'amplification différentielle A_D .

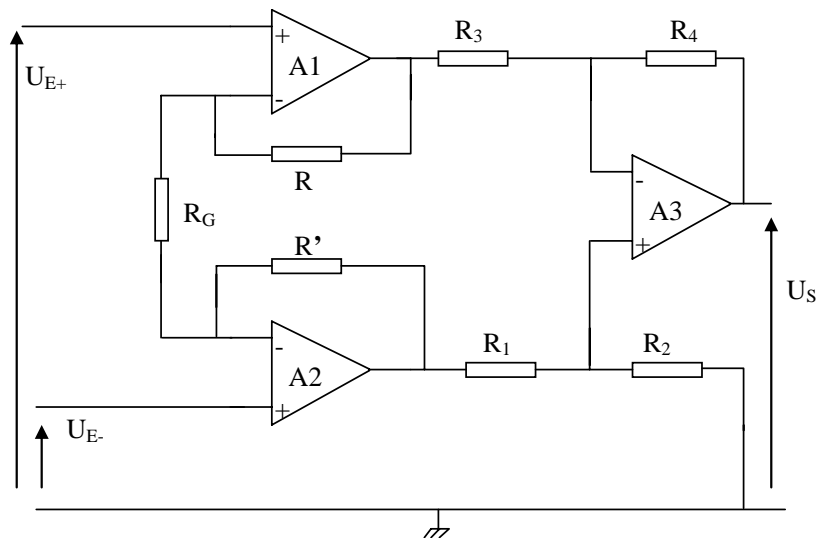


Figure 12 : Structure à trois amplificateurs

B3-4.4. Ce même principe est utilisé dans l'amplificateur d'instrumentation INA114 (Annexe 3) dont le schéma est donné par la figure 13. *Donner dans ce cas l'expression de A_D en fonction de R_G . Que vaut l'amplification si on ne connecte pas la résistance R_G*

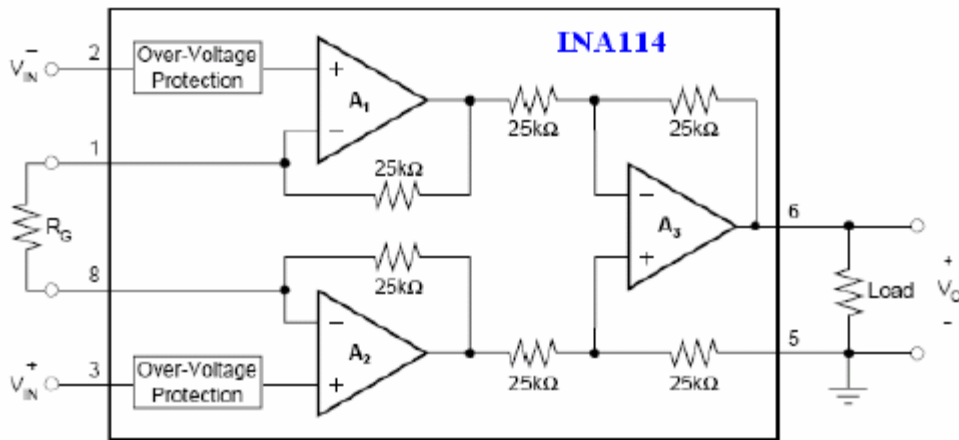


Figure 13 : Principe du INA114

B3-5. *Quel est le circuit le plus adéquat à placer à la sortie du capteur de pression entre (INA 106) et (INA114) si la plage de mesure du convertisseur analogique numérique à utiliser, dans la bande de fréquence voulue, s'étend de 0 à 5V. Justifier votre réponse.*

B4. Conversion analogique numérique

B4-1. A la sortie du filtre analogique de la chaîne de mesure de la pression on utilise un convertisseur analogique numérique à approximations successives, dont le schéma de principe est donné par la figure 14.

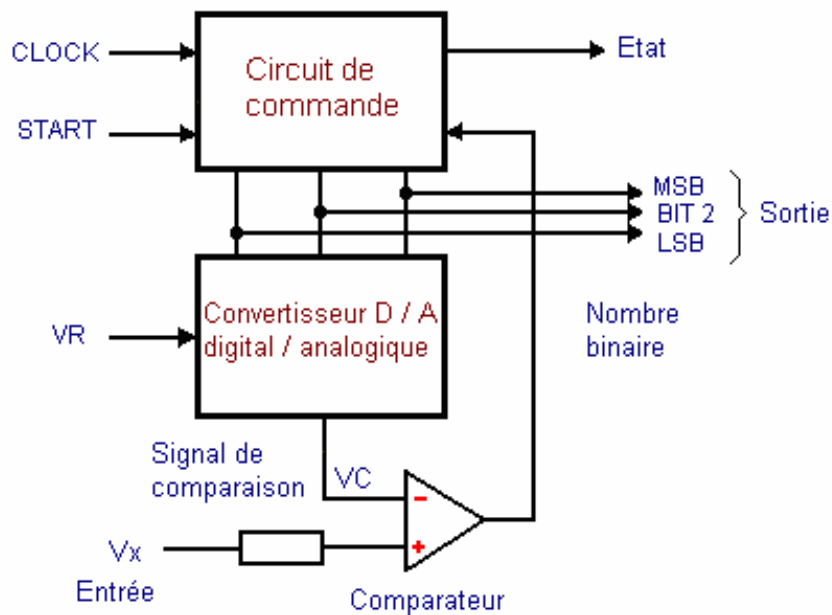


Figure 14 : Schéma de principe d'une CAN à approximations successives

- B4-1.1.** Représenter sur (DR3-(a)) l'évolution numérique à la sortie pour une tension d'entrée $V_{x1} = 5PE/8$. PE étant la Pleine Echelle égale à 5V.
- B4-1.2.** En déduire la valeur numérique correspondante à cette valeur particulière de V_{x1} .
- B4-1.3.** Calculer le quantum (pas du convertisseur) et représenter sur (DR3-(b)) la caractéristique de transfert liant l'entrée V_x et la sortie numérique N_x .
- B4-2.** Le convertisseur à approximations successives utilisé est l'ADC0809 de National Semiconductor (Annexe 4) ayant huit bits de sortie et comportant un multiplexeur analogique à huit voies.
- B4-2.1.** Exprimer la variation maximale V autorisée en fonction de la tension de référence V_R , le temps de conversion et la résolution du convertisseur. Calculer dans ce cas V pour $V_R = V_{REF(+)} = 5V$, $V_{REF(-)} = Gnd$.
- B4-2.2.** Proposer une solution dans le cas où le signal varie beaucoup plus rapidement.

III. TRAITEMENT NUMERIQUE

C. Le microcontrôleur 8051

Pour l'acquisition des signaux issus des capteurs d'ozone et de la pression, nous utilisons un CAN piloté par un microcontrôleur 8051 (Annexe 5). Le convertisseur utilisé est l'ADC0809 (Figure 15). Ce convertisseur permet d'acquérir 8 signaux analogiques (Annexe 4).

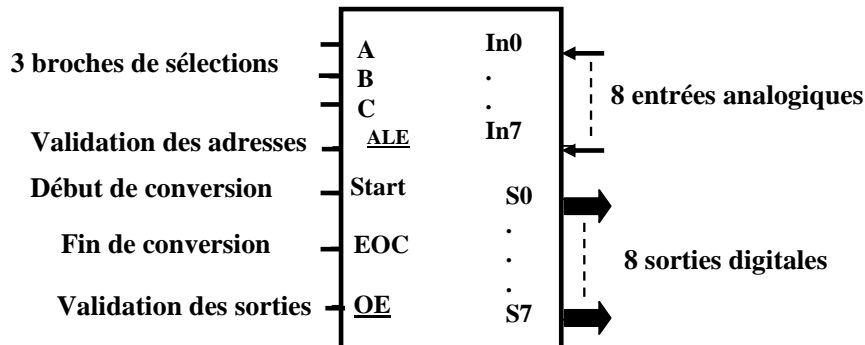


Figure 15 : Brochage simplifié de l'ADC0809

Pour convertir une voie analogique en numérique, il faut suivre les étapes suivantes (Annexe_4).

- Sélectionner une entrée parmi 8 avec A, B et C (000 pour In₀,....., 111 pour In₇) et mettre la broche ALE à zéro.
- Une impulsion positive sur la broche START permet de démarrer la conversion.
- La fin de la conversion est donnée par EOC.
- Pour la lecture des sorties (S₀..S₇) on met la broche OE à zéro.

Les connexions entre l'ADC0809 et le MC 8051 sont:

- Les sorties S₀.....S₇ sont connectées au port P2
- Les entrées A, B et C sont reliées respectivement à P1.0, P1.1 et P1.2, la broche ALE à P1.3
- La broche START au P3.1, la broche EOC à P3.2 et la broche OE à P3.3

C1- Etude de la carte d'acquisition à base du μ C 8051

C1-1. Quelle est l'architecture du Microcontrôleur 8051 ? Expliquer brièvement la différence avec cette architecture et celle utilisée dans les microprocesseurs.

C1-2. Donner la taille de l'espace adressable du μ C 8051

C1-3. Quelle est l'utilité du processeur Booléen utilisé par le μ C 8051 ?

C1-4. Donner le schéma de connexion entre le microcontrôleur 8051 et l'ADC0809. Sachant que les sorties issues des capteurs sont respectivement connectées aux entrées IN₀ et IN₁.

C-2 Programmation de la carte d'acquisition

- C2-1. Ecrire une procédure ACQ en assembleur 8051 permettant l'acquisition d'un signal analogique connectée à l'entrée INx avec $x \in \{0...7\}$.*
- C2-2. On veut faire l'acquisition et le rangement dans un tableau de 100 échantillons d'un signal issu du capteur d'ozone connecter à IN0. Ecrire une procédure STOCK en assembleur 8051 permettant l'acquisition et le stockage des échantillons.*
- C2-3. Ecrire le programme principal qui permet d'acquérir les signaux issus des deux capteurs et de ranger les échantillons dans deux tableaux différents (TABOZONE et TABPRESSION)*
- C2-4. Ecrire une procédure TRANS permettant de transmettre les données stockées dans les tableaux vers un PC à travers la liaison série RS232. La vitesse de transmission est de 4800 bauds sans contrôle de parité. La fréquence du microcontrôleur étant de 11.059 Mhz.*

IV. TRANSMISSION NUMERIQUE PAR INFRAROUGE

D. Transmission du code RC5 par infrarouge

Il s'agit de transmettre à partir du microcontrôleur, et sur une distance allant jusqu'à 100 m, le code RC5 (Remote Control, génération 5).

D-1 Codage utilisé

Constitution d'une trame en code RC5

Elle se compose d'une suite de 14 bits répartis comme suit (Figure 16) :

- 2 bits de start ;
- 1 bit de répétition (R) ;
- 5 bits d'adresse (A4, A3, A2, A1, A0) ;
- 6 bits de commande (D5, D4, D3, D2, D1, D0).

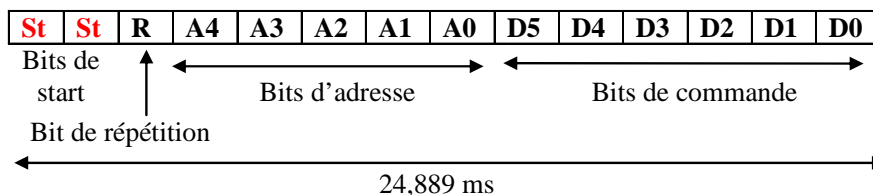


Figure 16 : Constitution d'une trame en code RC5

Les deux bits de start sont utiles pour permettre, en deux périodes d'horloge, la stabilisation du niveau de la commande automatique du gain AGC (Automatic Gain Control) du récepteur.

Le bit de répétition R indique une nouvelle transmission de données. Sa valeur change à chaque nouvelle activation d'une touche afin de distinguer une nouvelle pression d'une pression continue sur la même touche.

Les cinq bits suivants A_i sont les bits d'adresse système permettant l'adressage de 32 appareils différents.

Les six bits de commande D_i sont les bits de donnée destinés aux récepteurs pour déclencher la fonction désirée ; ce qui donne $2^6 = 64$ instructions.

Les bits du code RC5 sont codés en biphase (codage Manchester) qui consiste à introduire des transitions systématiques pour chaque bit transmis.

D1-1. Comment est alors composé chaque bit ? Représenter un bit en « 1 » et un bit en « 0 ».

D1-2. Proposer une réalisation simple de ce codage.

La durée d'un bit, soit la période de l'horloge de transmission est de 1,778 ms. Une trame RC5 dure alors $14 \times 1,778 = 24,892$ ms. Mais pratiquement la durée est limitée volontairement à 24,889 ms.

D1-3. Expliquer quelle est la raison ce choix ?

La périodicité des messages (ou trame) à été choisie comme tel : c'est un multiple de la durée d'un bit soit, $64 \times 1,778 = 113,792$ ms (113,78 ms exactement).

Afin de garantir l'intégrité des données, on peut utiliser un générateur de code d'erreur de Hamming. On pose le mot d'information à 11 bits : $X = A_4 A_3 A_2 A_1 A_0 D_5 D_4 D_3 D_2 D_1 D_0$

Pour détecter les erreurs de transmission, on envoie généralement, en plus de l'information utile, un certain nombre de bits de contrôle déterminés selon une loi connue à la fois de l'émetteur et du récepteur (code de transmission). Choisir un code consiste à définir parmi les $N = 2^n$ messages à n bits possibles, les $M = 2^m$ que l'on fera correspondre de manière biunivoque aux M messages utiles à m bits. Chaque message de n bits contient donc m bits d'information utile et k bits de contrôle. On dit que l'on a affaire à un code (n,m).

Un code linéaire fréquemment utilisé en transmission numérique est le code de Hamming pour lequel on a la relation $n = 2^k - 1$. Une méthode pour construire un code Hamming (n,m) consiste à construire d'abord la matrice de vérification de code H(k,n). Cette matrice de k lignes est constituée de tous les $n = 2^k - 1$ vecteurs colonnes de k bits différents du vecteur zéro.

Pour transmettre le mot d'information à 3 bits $X_1 X_2 X_3$ on lui adjoint un seul bit de parité K de sorte que la parité générée du mot émis $X_1 X_2 X_3 K$ soit toujours paire.

D1-4. Donner l'expression de la fonction : $K(X_1, X_2, X_3)$

D1-5. On pose $f(a,b) = a \oplus b$; montrer que la fonction K peut se mettre sous la forme :

$$K = f[f(X_1, X_2), X_3] = f[f(X_2, X_3), X_1]$$

D1-6. Vérifier que l'on a pour une émission sans erreur du mot $X_1 X_2 X_3 K$:

$$f\{f[f(X_1, X_2), X_3], K\} = 0$$

D1-7. A la réception on reçoit $X'_1 X'_2 X'_3 K'$ et on forme $S = X'_1 \oplus X'_2 \oplus X'_3 \oplus K'$. Quelles sont les valeurs de S lorsqu'il n'y a pas d'erreur et lorsqu'il y a une seule erreur $X'_i = \overline{X_i}$ ou $K' = \overline{K}$

D-2 Etude de l'émetteur infrarouge

Nous utiliserons un procédé simple pour émettre un rayonnement infrarouge (par exemple une diode LED émettrice type IR-1300 ; LD 271 ou LD 274) modulé au rythme des données. La diode LED sera pilotée par un transistor adapté (par exemple : 2N 2222A ; BC517 ; IRL510) présentant un grand gain en courant et une tenue élevée aux impulsions de courant de collecteur (Figure 17).

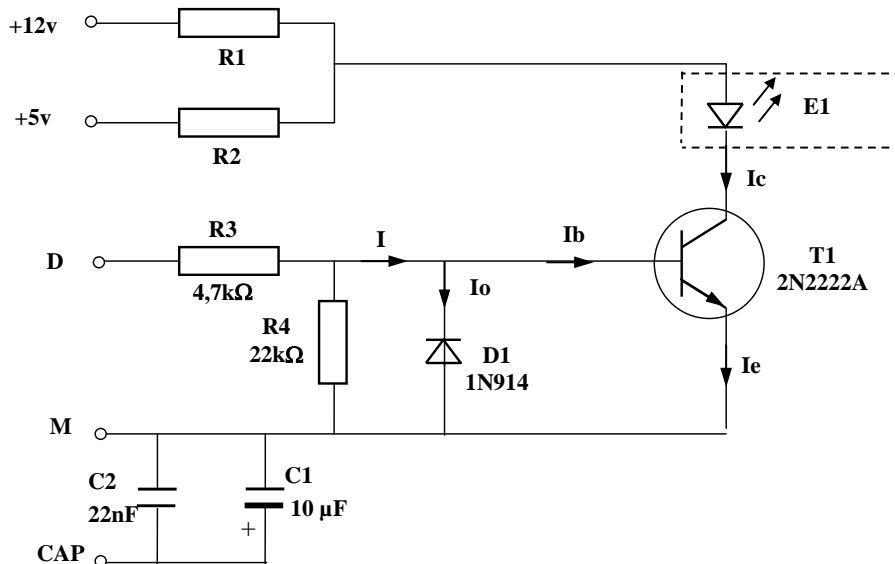


Figure 17 : Montage utilisé pour émettre un rayonnement infrarouge

Les caractéristiques du transistor 2N 2222A sont données par la table suivante :

| Vcb max | Vce max | Veb max | Ic max | Ptot | Ft min | β | Ic(β=100) |
|---------|---------|---------|--------|--------|---------|---------|-----------|
| 75V | 40V | 6V | 800 mA | 500 mW | 300 MHz | 100-300 | 150 mA |

D2-1. Le circuit peut être alimenté sous 5V ou 12 V, donner la raison de ce choix.

D2-2. En supposant que le transistor travaille en régime linéaire, calculer le courant collecteur I_c en fonction du gain β , I d'entrée, I_0 en D_1 et I_{c0} (valeur de I_c lorsque $I_e=0$). En déduire le rôle de la diode D_1 .

D2-3. Dans quel régime travaille le transistor T1 du montage lorsque le signal d'entrée est numérique ?

En partant d'une fréquence de 36 KHz (Figure 18), nous obtenons une période de :

$$1 / 36000 = 27,76 \mu s.$$

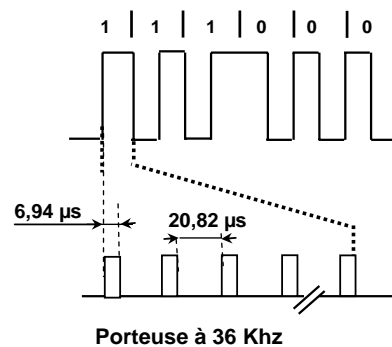


Figure 18

D2-4. En observant le chronogramme de la figure 18, déterminer le rapport cyclique.

D2-5. Si l'on veut fabriquer un émetteur infrarouge modulé à 36 KHz, quelle est la fréquence minimale nécessaire à l'horloge de ce système séquentiel.