

FICHE PROF

PROJET : Régulation de température
Thermorégulateur de bain marie / Régulation d'une tête d'imprimante 3D

Capacités exigibles :**Seconde :**

Mesurer une grandeur physique à l'aide d'un capteur électrique résistif.
Produire et utiliser une courbe d'étalonnage reliant la résistance d'un système avec une grandeur d'intérêt (température, etc.).
Utiliser un dispositif avec microcontrôleur et capteur.

TSTL SPCL Systèmes et procédés : voir annexe jointe page 78

BTS CRSA : Voir annexe jointe page 82

Objectifs :

Mener à bien un projet à base de microcontrôleur amenant à la **réalisation d'un thermorégulateur de bain marie ou d'une régulation de température pour tête d'imprimante 3D.**

Programme abordé :

Ce projet fait référence à des notions abordées en classes de 2^{nde}, 1^{ère} et terminale (particulièrement Systèmes et Procédés en TSTL SPCL) ET/OU enseignement supérieur (BTS).

Le projet étant découpé en sous parties, **chaque enseignant(e) pourra faire le choix d'aborder une notion particulière ou un ensemble de notions sous forme de TP tournants ou encore dans une mise en situation de travail par équipes.**

Compétences travaillées :

- S'approprier
- Analyser/Raisonner
- Réaliser
- Valider
- Communiquer

Prérequis :

- Loi des nœuds, loi des mailles, loi d'Ohm.
- Puissance électrique
- Quelques notions de programmation sur Arduino

Organisation de la ressource :

- Page 3 : [présentation du projet](#)
- Page 5 : [rappels sur les chaînes d'information et d'énergie](#)
- Page 7 : [Utilisation des capteurs](#)
- Page 10 : [Courbe d'étalonnage de la thermistance](#)
- Page 14 : [Courbe d'étalonnage du LM35](#)
- Page 15 : [Etude du conditionneur pour la thermistance](#)
- Page 18 : [Réflexion sur le choix du capteur](#)
- Page 20 : [Utilisation du LM35](#)
- Page 21 : [Etude du CAN du microcontrôleur](#)
- Page 24 : [Réflexion sur l'incertitude de type A](#)
- Page 27 : [Amélioration de la sensibilité du capteur](#)
- Page 30 : [Fonction filtrage](#)
- Page 35 : [Etude de la puissance de chauffe](#)
- Page 37 : [Etude du relais](#)
- Page 40 : [Régulation de température : le comparateur un seuil et deux seuils](#)
- Page 42 : [La commande PWM](#)
- Page 44 : [Préparation du module MOSFET](#)
- Page 46 : [Principe de la régulation avec correcteur proportionnel](#)
- Page 48 : [Principe de la régulation avec correcteur Proportionnel Intégral](#)
- Page 50 : [Principe de la régulation avec correcteur Proportionnel Intégral Dérivé](#)
- Page 52 : [Réalisation d'un filtrage numérique](#)
- Page 54 : [Schéma du montage](#)
- Page 55 : [Les programmes Arduino](#)
- Page 65 : Annexes 1 et 2 : fiches techniques LM35 et thermistance
- Pages 78 : Annexe 4 : Programme Système des Procédés TSTL SPCL
- Pages 82 : Annexe 5 : Programme BTS CRSA

Matériel : (suivant la complexité du projet)

- Une thermistance
- Un capteur de température LM35
- Un relais 5V
- Un module à transistor Mosfet
- Un module amplificateur de tension à base d'amplificateur opérationnel
- Une carte microcontrôleur de type « Arduino »
- Résistance et condensateur
- Un béc, de l'eau, des glaçons, un ballon, un chauffe ballon, une potence.
- Un multimètre, un oscilloscope.
- Des fils de connexion, de la gaine thermo-rétractable, du vernis à ongle.
- Une résistance de chauffe type thermoplongeur ou/et une extrudeuse assemblée pour imprimante 3D
- Un ordinateur avec le logiciel IDE Arduino, tableur type « Excel » et/ou Regressi .

Présentation des projets

Situations déclenchantes

Thermorégulateur de bain marie

[product-121518-842144.html](https://www.medicaexpo.fr/prod/raypa/product-121518-842144.html)

<https://www.medicaexpo.fr/prod/raypa/>



Dans les laboratoires pharmaceutiques, en industrie, dans l'enseignement, il est parfois nécessaire de **maintenir une solution à une température très stable**.

Le type de produit présenté ci-contre est utilisé en histopathologie.

Il est utilisé pour incuber les échantillons d'eau, chauffer les réactifs, fusionner le substrat ou pour l'incubation de culture cellulaire. Il peut être utilisé avec de l'eau ou de l'huile.

Sa régulation de température se fait avec un microprocesseur.

Définition : (wikipédia)

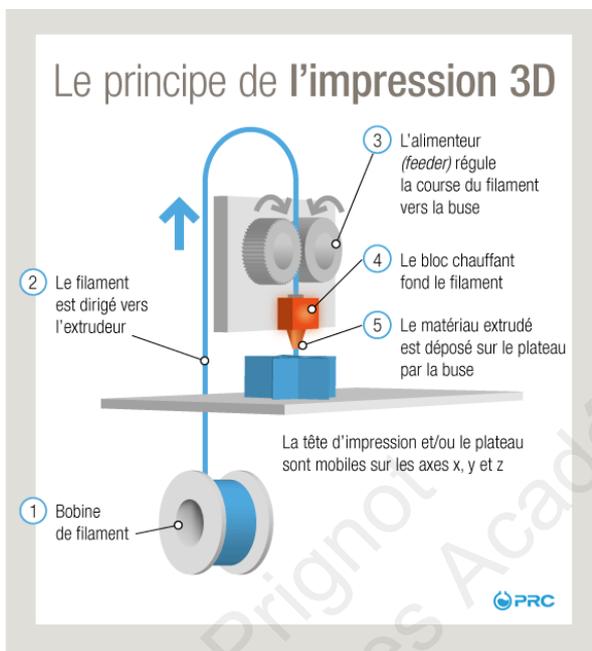
L'histopathologie est la discipline botanique ou médicale destinée à faire un diagnostic par l'étude microscopique des tissus (vivants ou morts).



Video présentation produit

CARACTÉRISTIQUES		DESCRIPTION
Applications	d'histopathologie, pour la microbiologie, d'enseignement, pour l'industrie pharmaceutique, pour la recherche préclinique	Incuber les échantillons d'eau, chauffer le réactif, fusion du substrat, incubation de la culture cellulaire, etc. A utiliser avec de l'eau ou de l'huile.
Thermorégulation	thermostaté, contrôlé par microprocesseur	Features Régulation numérique de la température et lecture par microprocesseur avec P.I.D. et sonde de température PT100. Minuterie: démarrage et arrêt du cycle de programmation (minute/heure/jour/mois/année). Temps de maintien en température programmable (illimité). Sécurité selon norme EN 61010-1. Thermostat de sécurité avec réarmement manuel selon la norme DIN 12877 classe 2. Cuve intérieure en acier inoxydable AISI-304 et meuble extérieur en acier inoxydable AISI-304. Résistance électrique en acier inoxydable à l'intérieur de la cuve. Robinet de vidange incorporé. Grille de protection de la résistance. Remplissage maximum: 80% de la capacité totale. Remplissage minimum: 50% de la capacité totale.
Configuration	de paillasse, compact	
Plage de température	Min: 5 °C (41 °F) Max: 200 °C (392 °F)	
Capacité	Min: 5 l (1,3 gal) 5 l, 12 l, 20 l, 40 l (1,3 gal) Max: 40 l (10,6 gal)	

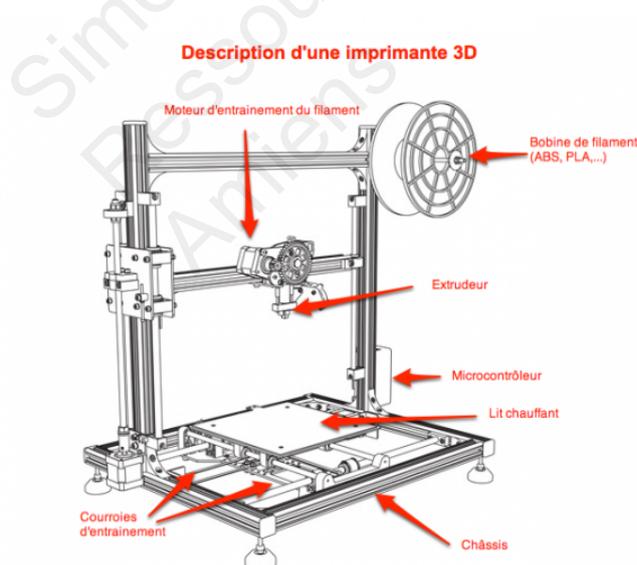
Régulation de température pour tête d'impression 3D



Le principe d'une imprimante 3D est décrit ci-contre.

Le bloc chauffant doit maintenir une température stable (réglable) permettant la fonte du filament.

La consigne de chauffe et la régulation de température sont gérées numériquement.

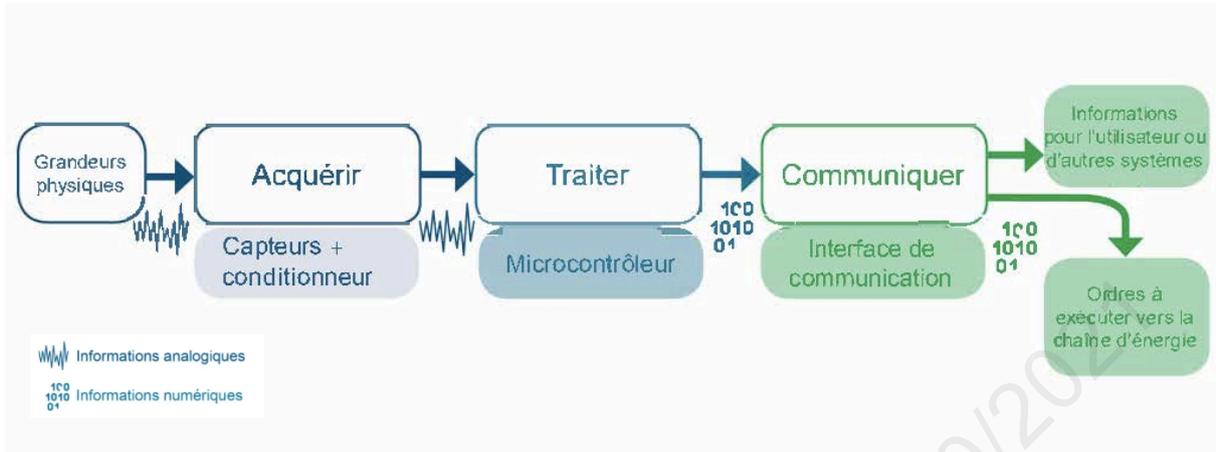


Bloc de chauffe de l'imprimante (au niveau de l'extrudeur)



Rappels sur la chaîne d'information et la chaîne d'énergie

La chaîne d'information :



Acquérir :

C'est la fonction qui permet de prélever des informations à l'aide de **capteurs**, de **détecteurs**, de codeurs accompagnés éventuellement de montages permettant la mise en forme du signal : **pont diviseur de tension, amplificateur, filtre...**

Traiter :

C'est la partie commande composée d'un automate ou d'un **microcontrôleur**.

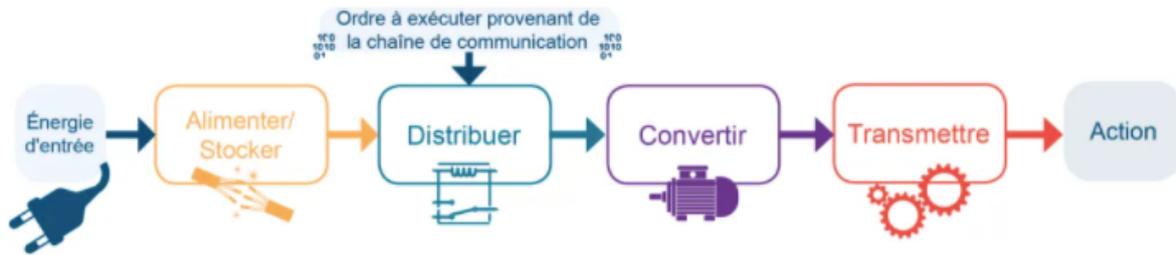
Communiquer :

C'est la fonction qui donne les **ordres de commande** à la chaîne d'énergie et apporte un **compte rendu** des informations à l'utilisateur (Voyants, écrans, buzzer...).

À retenir

- Un système automatisé a besoin d'informations pour fonctionner de manière autonome. Le flux d'information se représente sous la forme d'une **chaîne d'information**.
- Tout d'abord, les **grandeurs physiques** sont acquises par des **capteurs**.
- Les signaux générés par ces capteurs (souvent analogiques) sont convertis puis transmis au **microcontrôleur** qui traite les informations.
- Enfin, les informations traitées donnent des ordres à la chaîne d'énergie et sont communiquées vers une **interface Homme/Machine** (écran, voyant, haut-parleur...) ou vers **un autre système** (ordinateur, smartphone...).

La chaîne d'énergie :



Alimenter :

Ce sont la plupart du temps des composants tels que des **prises électriques**, des **câbles**, etc.

Stocker :

Le composant de stockage le plus connu et le plus répandu est sûrement la **batterie électrique**. Il existe d'autres moyens de stockage d'énergie : le **ressort** et l'**air comprimé** qui stockent de l'énergie mécanique et bien sûr les **réservoirs** de combustibles qui stockent de l'énergie chimique (combustibles).

Distribuer :

La fonction "distribuer" est assurée par tous les composants qui **acheminent** et qui **gèrent** l'énergie d'entrée vers les convertisseurs. On y retrouve des **câbles électriques**, des **contacteurs**, des **relais**, des **interrupteurs**, des **électrovannes** etc.

Convertir :

Ce sont des convertisseurs d'énergie qui remplissent cette fonction. Par exemple : les **moteurs électriques**, les **moteurs à combustion**, les **radiateurs électriques**, les **alternateurs (générateurs)**, les **panneaux photovoltaïques** etc. Même un haut-parleur est un convertisseur d'énergie.

Transmettre :

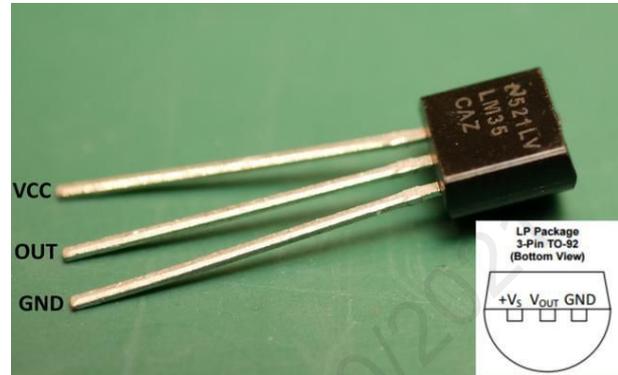
Ce sont généralement des **mécanismes (engrenages, réducteurs, roues, hélices, vis sans fin, crémaillères** etc.) qui agissent sur la **matière d'œuvre** de l'objet technique. Ainsi, l'action du système s'effectue.

À retenir

- Un système ou objet technique a toujours besoin **d'énergie**.
- Tous les systèmes sont **alimentés** et peuvent **stocker de l'énergie**. Les ordres venant de la chaîne d'information conduisent à **distribuer** l'énergie, à la **convertir** et enfin à la **transmettre**.
- On appelle **flux d'énergie** : la **circulation de l'énergie** à travers l'objet technique.

Utilisation des capteurs

Nous utiliserons et comparerons dans ce projet 2 types de capteurs de température : Une thermistance CTN et le capteur de température LM35.



Thermistance CTN

100 K

LM35



Le capteur doit-il fonctionner dans des conditions physiques particulières ?

En effet, nous devons prendre en compte le fait que dans le projet « bain marie » le capteur doit travailler dans un liquide (de l'eau ici). Est-ce que cela peut perturber le fonctionnement ?

L'élève peut plonger le LM35 dans l'eau et constater que la mesure ne se fait plus. Pour la thermistance c'est moins évident mais les mesures électriques seront-elles les mêmes faites au sec et immergée ? Eau et électricité font rarement bon ménage !

L'élève est amené à faire une proposition pour rendre les mesures « exploitables »

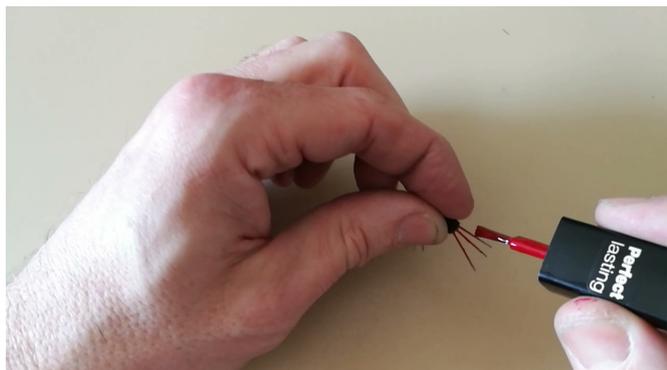
Ici, on a retenu la solution **d'étanchéifier** le composant.

Construction d'un capteur LM35

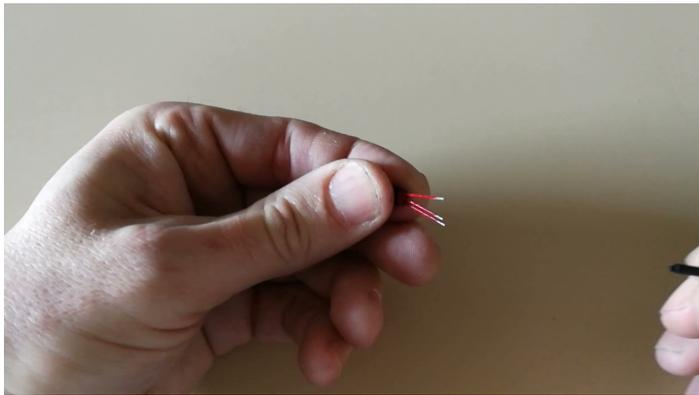
Cette étape dépend grandement du temps que l'on peut consacrer au projet. Mais généralement elle est appréciée par l'élève. **Attention toutefois à l'usage de la flamme !**

Afin de rendre le capteur étanche, on utilise ici du **vernis à ongle ainsi que de la gaine thermorétractable**.

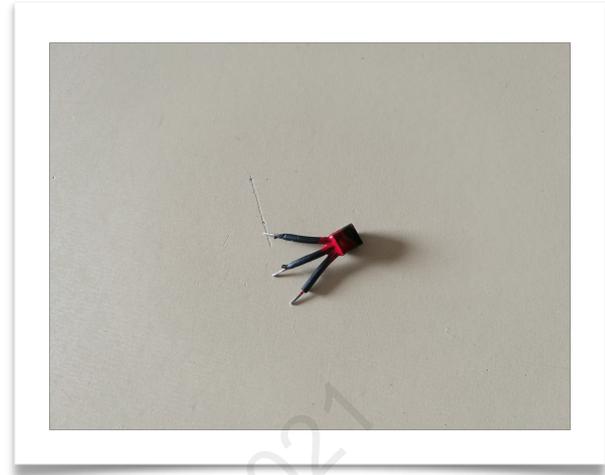
Étape 1 : Application du vernis



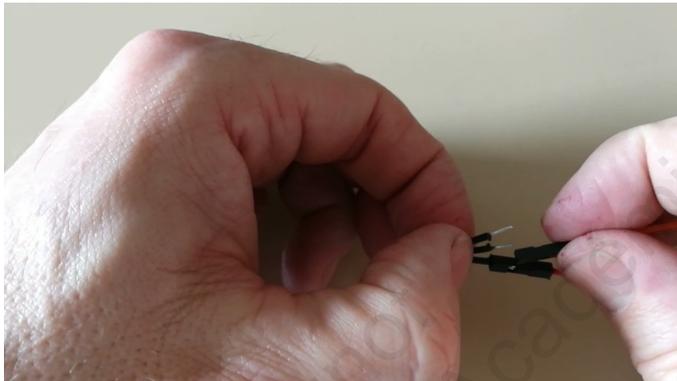
Étape 2 : Mise en place d'une première gaine.



Vidéo : Attention aux doigts...



Étape 3 : On raccorde les connexions.



Vidéo : Attention à **mettre en place un code couleur**. Vous ne pourrez plus distinguer les broches par la suite !

Étape 4 : Mise en place de la gaine finale



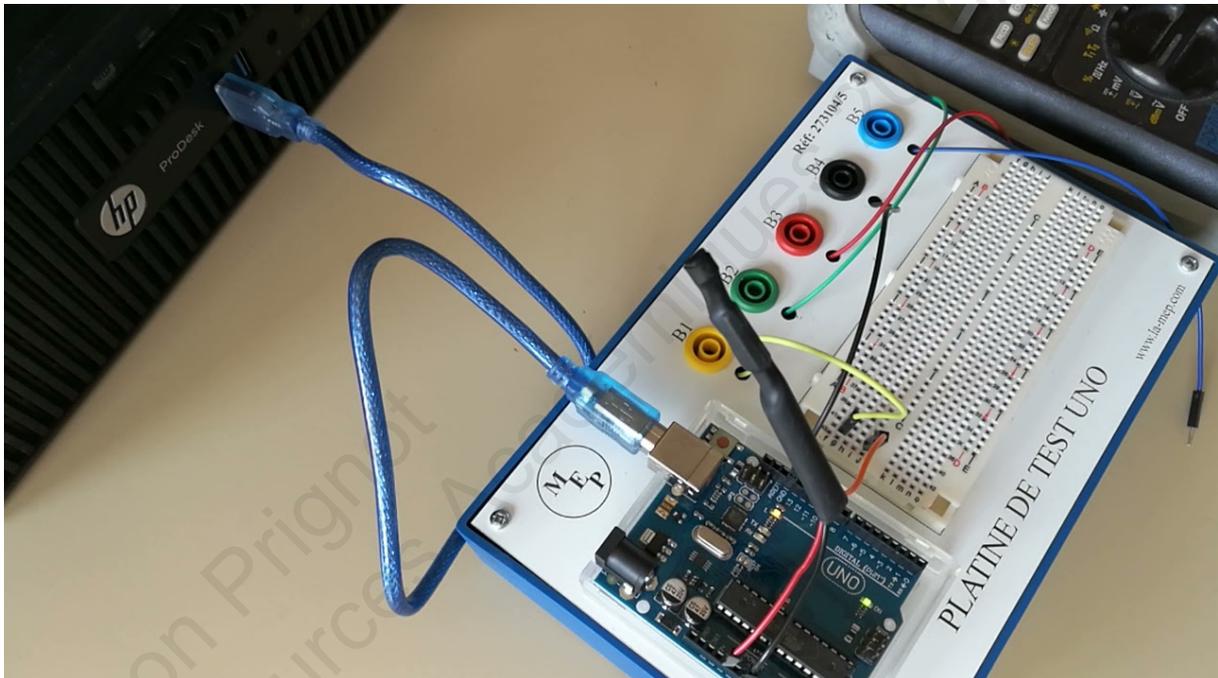
Vidéo : La gaine doit bien s'ajuster sur le composant.

Étape 5 : Remplir de silicone



Si le capteur est amené à être totalement immergé, veillez à bien étanchéifier le sommet avec du silicone par exemple.

Étape 6 : Vérifier le bon fonctionnement du capteur



Vidéo : test du capteur

Utilisation de la thermistance

Pour la thermistance, le même procédé peut être adapté. Toutefois, si les courbes d'étalonnages sont faites dans l'eau, on peut considérer que les conditions du bain seront identiques.



Courbe d'étalonnage de la thermistance



Comment évolue la résistance de ce capteur avec la température ?
Tracez la caractéristique $R_{TH}=f(T)$.

Une thermistance est un capteur de température qui se comporte comme une résistance dont la valeur dépend de la température : on l'appelle pour cette raison une **thermistance** (préfixe « **thermi** » pour **thermique** ; suffixe « **istance** » pour **résistance**).



L'objectif de cette partie est de tracer la courbe d'étalonnage de cette thermistance CTN. Pour cela, il faut mesurer avec un Ohmmètre la résistance $R^{(1)}$ de ce capteur pour différentes températures T du milieu dans lequel il se trouve puis, il faut tracer le graphique $R_{th} = f(T)$ qui montre la dépendance de la résistance du dipôle en fonction de la température.

(1) L'indice $_{th}$ signifie thermistance.

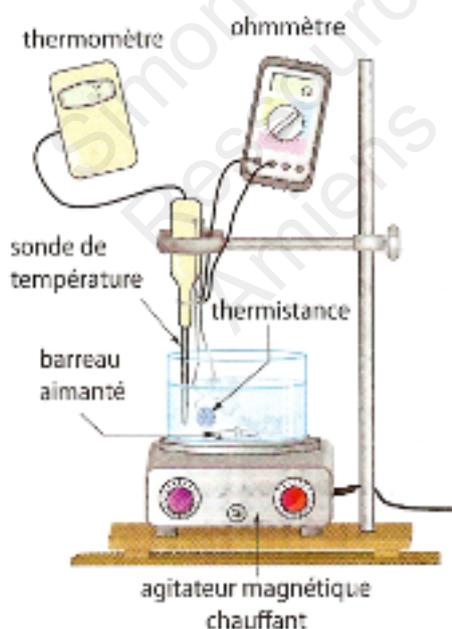
Consigne : Avec le matériel mis à ta disposition, propose et met en place un protocole expérimental afin de construire un tableau de valeurs qui te permettra ensuite de tracer la courbe d'étalonnage de la thermistance.

Matériel :

Un bécher, de l'eau, des glaçons, un thermomètre numérique de référence (précision $\pm 0,1^\circ\text{C}$), un ballon, un chauffe ballon, une potence, un Ohmmètre, la thermistance (avec les pattes gainées), 2 fils de connexion (+ 2 pinces crocodiles) pour l'Ohmmètre.



Pour cela, on peut demander à l'élève d'élaborer un protocole en faisant un schéma de l'expérience.



Dans un tableau, relever les valeurs de la résistance de la thermistance pour différentes valeurs de la température.

Représenter graphiquement sur Excel l'évolution de la valeur de la résistance en fonction de la température en $^\circ\text{C}$.

Comment déduire du graphique la température ambiante de la pièce?

Justifier le nom CTN (Coefficient de Température Négatif)

Quelle est la valeur expérimentale de la résistance de la thermistance CTN utilisée à 298 K (25°C)?



Est ce que cette valeur est cohérente avec la doc technique ?

Rendez vous sur le site suivant :

<https://www.thinksrs.com/downloads/programs/therm%20calc/ntccalibrator/ntccalculator.html>

Celui-ci vous propose 2 modèles de courbes : le modèle B et le modèle SH (du nom des chercheurs John Steinhart et Stanley Hart qui ont développé cette équation)

Le modèle Bêta (Modèle simplifié de Steinhart et Hart):

$$R_T = R_0 e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

Dans cette relation R_0 est la valeur de la résistance à 25° C.

T_0 correspond à 25°C en Kelvin soit 298,15 K

T est la température en Kelvin.

B est un coefficient trouvé pour la thermistance.

Il est possible de retrouver la température avec la relation réciproque :

$$T = \frac{B}{\ln \left(\frac{R}{R_0 \cdot e^{-\frac{B}{T_0}}} \right)}$$

Le modèle de SteinHart-Hart :

La relation devient :

$$R_{(T)} = R_0 \times e^{(A+B/T+C/T^2+D/T^3)}$$

A, B, C et D sont 4 coefficients qu'il faut retrouver avec 4 mesures de R et T. (3 si C est négligé)

Là encore, il est possible de retrouver la température connaissant $R_{(T)}$.

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + D[\ln(R)]^3 \quad (\text{le terme en avec le coefficient C est négligé})$$

(Les coefficients A, B, et D peuvent être aussi retrouvés avec un programme python fourni)

Rapprochez ces résultats de la documentation technique :

$$T_{(R)} = \left(A_1 + B_1 \ln \frac{R}{R_{\text{ref}}} + C_1 \ln^2 \frac{R}{R_{\text{ref}}} + D_1 \ln^3 \frac{R}{R_{\text{ref}}} \right)^{-1}$$

Thermistance de 4,7 Kohms

ASRS Calculatrice de thermistance V1.1
pour les contrôleurs à diode laser et TEC
par Stanford Research Systems Inc

Veillez saisir les paires résistance-température:
(N'utilisez pas la touche Entrée)

R (Ω) T (° C)

R1: T1:

R2: T2:

R3: T3:

Coefficients calculés du modèle de Steinhart-Hart:

A = e-3
B = e-4
C = e-7 Voir modèle SH

Coefficients calculés du modèle β:
(R3 et T3 ne sont pas utilisés)

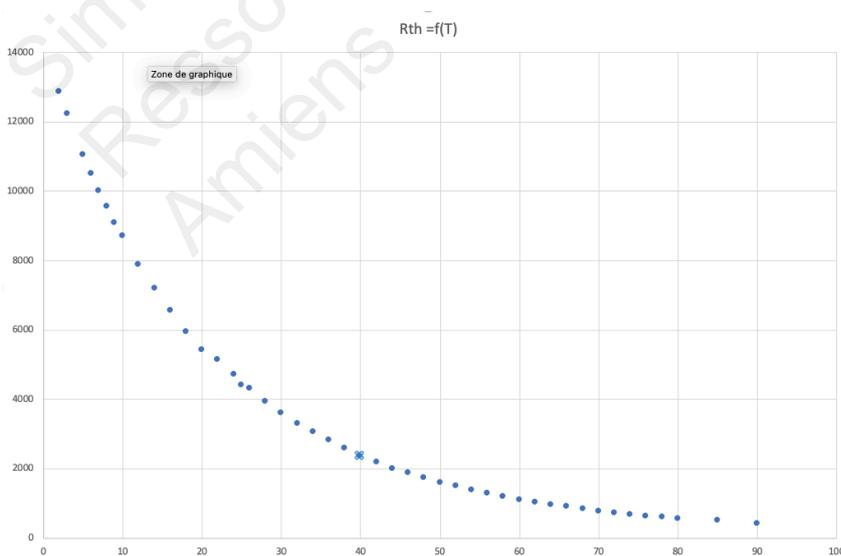
R (25 ° C) = Ω
β = K Voir le modèle β

Calculatrice du modèle de température des données (° C) (les coefficients indiqués à gauche sont utilisés)

β SH Données

R (Ω) ↔ T (° C)

↔ **Modèle SH**
Utilisez les touches ↓ ↑ **modèle β**



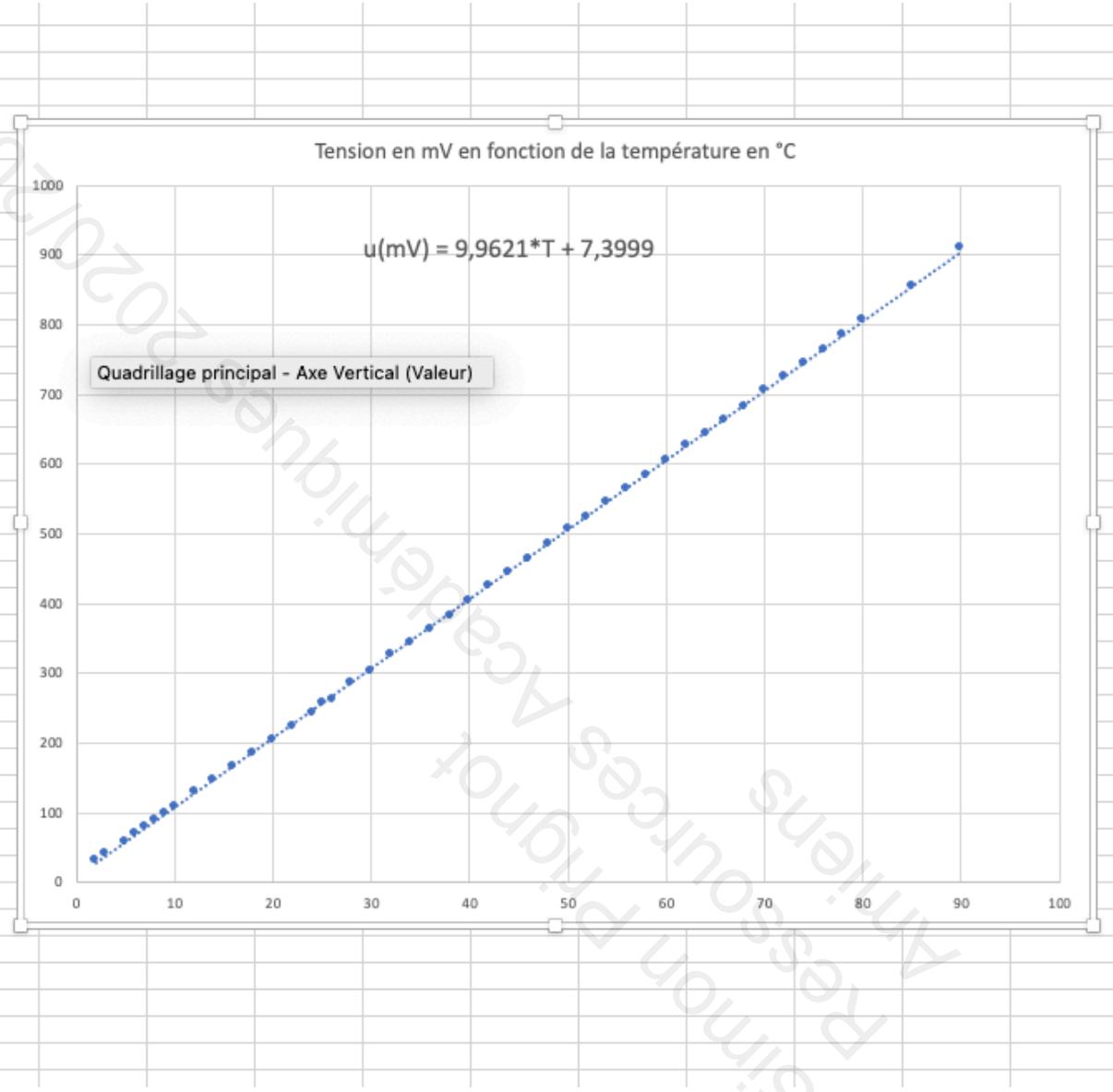
On remarque que les modèles sont très proches dans cette gamme de température.

En comparant, on remarque toutefois une précision plus importante avec le modèle de Steinhart/Hart avec des écarts inférieurs à 0,1%.

température en °C	température en K	thermistance en Ohms	thermistance Modèle B	ecart T-TB rel en %	Température (T) modèle B	Modèle SH	Température Modèle SH	Ecart rel T-TSH en %
2	275,15	12860	12852,33918	0,959691539	272,5094087	0,0036349	275,1133743	0,013311178
3	276,15	12220	12220,00459	0,96314583	273,4902728	0,0036212	276,1499999	2,50354E-08
5	278,15	11050	11059,16635	0,97005369	275,4517957	0,0035944	278,2120672	-0,022314286
6	279,15	10500	10526,42342	0,973507259	276,4324545	0,0035808	279,2675337	-0,042104149
7	280,15	10020	10022,87588	0,976960587	277,4130449	0,0035684	280,2405029	-0,03230516
8	281,15	9560	9546,744667	0,980413674	278,393567	0,0035559	281,2231704	-0,026025384
9	282,15	9100	9096,36945	0,98386652	279,3740206	0,0035428	282,2602581	-0,039077836
10	283,15	8700	8670,199998	0,987319126	280,3544059	0,0035309	283,2109719	-0,021533411
12	285,15	7890	7884,781256	0,994223614	282,3149714	0,0035051	285,2957387	-0,051109475
14	287,15	7200	7180,003385	1,00112714	284,2752634	0,003481	287,2705212	-0,041971511
16	289,15	6550	6546,696292	1,008029703	286,2352821	0,0034562	289,3355613	-0,064174762
18	291,15	5940	5976,827086	1,014931303	288,1950275	0,0034306	291,4945376	-0,118336789
20	293,15	5420	5463,348004	1,021831942	290,1544997	0,0034067	293,5417416	-0,133631809
22	295,15	5150	5000,066077	1,028731618	292,1136986	0,0033934	294,6938159	0,154560087
24	297,15	4720	4581,531235	1,035630332	294,0726245	0,0033707	296,6766857	0,159284647
25	298,15	4420	4387,52	1,039079329	295,051985	0,0033536	298,1846362	-0,011617036
26	299,15	4320	4202,94009	1,042528085	296,0312772	0,0033477	298,7130822	0,14605308
28	301,15	3940	3860,053044	1,049424876	297,989657	0,0033239	300,8549187	0,097984826
30	303,15	3610	3549,122784	1,056320706	299,9477638	0,0033013	302,9132465	0,078097822
32	305,15	3310	3266,832483	1,063215575	301,9055977	0,0032789	304,9778675	0,056409153
34	307,15	3060	3010,242317	1,070109483	303,8631587	0,0032587	306,8669021	0,09216927
36	309,15	2820	2776,743095	1,07700243	305,820447	0,0032378	308,8522781	0,096303369
38	311,15	2580	2564,016016	1,083894417	307,7774625	0,003215	311,0387912	0,035741203
40	313,15	2370	2369,997668	1,090785443	309,7342054	0,0031934	313,1499999	2,62581E-08
42	315,15	2190	2192,849558	1,09767551	311,6906756	0,0031732	315,1358395	0,004493264
44	317,15	2002	2030,931543	1,104564616	313,6468733	0,0031504	317,4181258	-0,08454228
46	319,15	1880	1882,778631	1,111452763	315,6027985	0,0031345	319,033516	0,036498204
48	321,15	1740	1747,080693	1,118339951	317,5584512	0,0031149	321,0408497	0,033987339
50	323,15	1608	1622,664699	1,125226179	319,5138316	0,0030949	323,1093392	0,012582654
52	325,15	1495	1508,479151	1,132111448	321,4689396	0,0030765	325,0398822	0,033866756

Courbe d'étalonnage du LM35

température en °C	Tension en mV
2	31,2
3	40,6
5	59
6	69,5
7	80
8	88,8
9	98,8
10	108,5
12	130
14	146
16	167
18	186
20	204
22	223
24	242
25	258
26	263
28	286
30	304
32	327
34	344
36	363
38	382
40	405
42	425
44	444
46	465
48	485
50	506
52	524
54	545
56	564
58	584
60	606
62	626
64	645
66	663
68	681,5



Retrouver la sensibilité LM 35 sur la fiche technique. Comparez cette sensibilité avec la modélisation. Quelle est la plage de mesure du LM 35 ?

Etude du conditionneur pour la thermistance

Placer un **capteur résistif** (température, pression, lumière, ...) dans un **pont diviseur de tension** reste une solution simple pour mesurer sa résistance à l'aide d'un microcontrôleur.

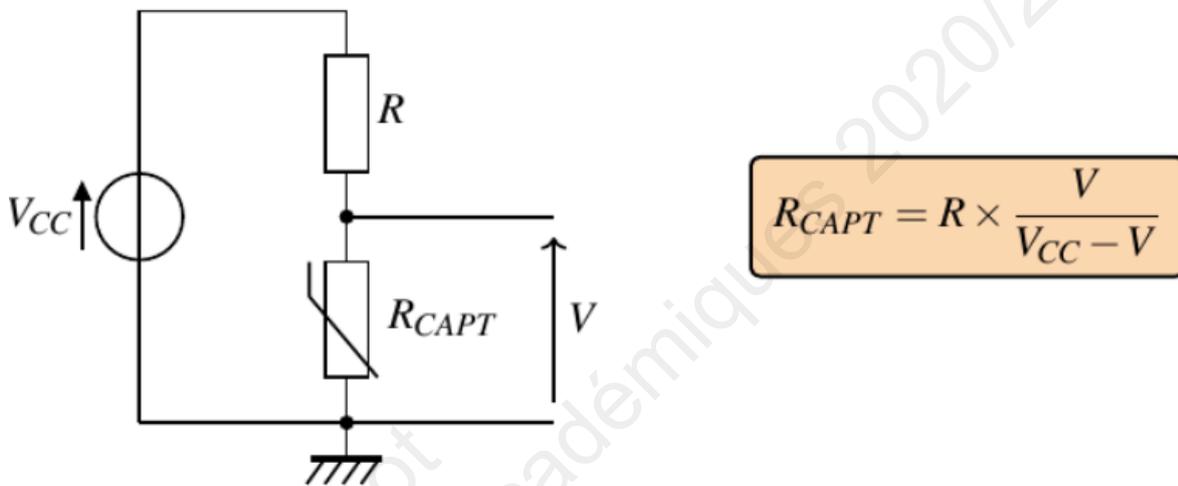


Expliquer le rôle de ce montage.

Obtenir une tension exploitable qui soit l'image de la résistance et donc de la température.



On peut chercher à retrouver la relation suivante :



Pour cela, on peut exploiter la relation du diviseur de tension.

J'aime aussi rappeler que la loi d'Ohm et la relation du diviseur de tension est une relation de proportionnalité (avec i constant) et donc que le « produit en croix » est applicable :

Tension	Résistance
---------	------------

La tension V est aux bornes de la résistance R_{CAPT}

La tension $V_{CC}-V$ est aux bornes de la résistance R

(La tension V_{CC} est aux bornes de la résistance équivalente $R+R_{CAPT}$)

en appliquant le produit en croix on obtient la relation précédente ou la relation du diviseur de tension.



Réaliser le montage sur la platine arduino.

En déduire l'algorithme du programme qui permettra d'en déduire la température

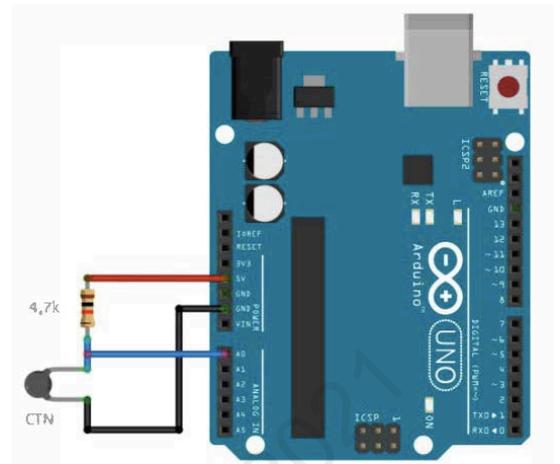
Nous utiliserons une résistance R de même valeur que celle de la thermistance (celle donnée à 25°C).

Ici $R=R_{TH}(25^{\circ}\text{C})=4,7\text{ k}\Omega$

Exemple d'algorithme :

REPETER EN BOUCLE :

Mesurer la tension U
 Calculer la résistance R
 Calculer la température T
 Afficher R et T
 Attendre 1 seconde



Dans un premier temps, il est possible de fournir le programme avec la mesure de la résistance .

Ensuite l'élève devra compléter le programme pour afficher la température correspondante.

Ce qui donne :

```
// Mesure de la resistance d'un CTN
// Calcul de la température à partir de la relation de
Steinhart-Hart

#define Vcc 5 // Tension d'alimentation
#define Ro 4700 // Résistance du pont
#define A 1.345609486e-3
#define B 2.291677945e-4
#define C 1.427209262e-7

float u; // Tension CTN
float R; // Résistance CTN
float logR; // ln(R)
float T; // Température en °C

void setup() {
  Serial.begin(9600); // Paramétrage du port série
  Serial.print("R = "); // Début affichage
  Serial.print("; ");
  Serial.println("T = ");
}
}
```

```

void loop() {
  u = analogRead(A0)*5.0/1024; // Lecture tension en V
  R = Ro * u/(Vcc-u);          // Calcul de la résistance
  logR = log(R);               // Calcul de ln(R)
  T = (1.0 / (A + B*logR + C*logR*logR*logR)); // Calcul de
  la température
  T = T - 273.15;              // Conversion en °C
  Serial.print(R);
  Serial.print("; ");
  Serial.println(T);          // Fin affichage
  delay(1000);                // Temporisation de 1s
}

```

Vous remarquerez dans ce programme 5,0 et non 5 ainsi que 1.0 et non pas 1.

Ceci est une source d'erreur sur Arduino.

Si on laisse 5, le calcul renverra un entier. C'est à dire 0 ici.

Simon Prignot
Ressources Académiques 2020/2021
Amiens

Réflexions sur tracé de la caractéristique $u_{TH}=f(T)$ et choix du capteur

L'ensemble capteur + conditionneur (pont diviseur) nous permet d'obtenir une tension U_{TH} qui varie en fonction de la température.



Comment évolue cette tension avec T ? Quelle est la sensibilité de l'ensemble ?

On peut réaliser cette étude expérimentalement en reprenant le protocole de la mesure de thermistance.

On peut aussi demander à l'élève de tracer cette évolution sur le tableur à partir de nos données expérimentales et de la relation du diviseur de tension.

A partir des courbes (page suivante), on en déduit :

Que la caractéristique $U_{CAPT}=f(T)$ n'est pas linéaire pour le montage avec thermistance.

Que la sensibilité du capteur en $mV/^{\circ}C$ n'est pas toujours la même et que donc la précision évoluera suivant la valeur de la température mesurée. Sur la courbe on constate que celle-ci est la meilleure de $0^{\circ}C$ à $30^{\circ}C$ avec une valeur optimale à $5,6 mV/^{\circ}C$.



Conclure sur cette première partie et comparez les 2 capteurs.

En conclusion :

On constate que la thermistance à une caractéristique non linéaire et que sa sensibilité varie contrairement au LM 35.

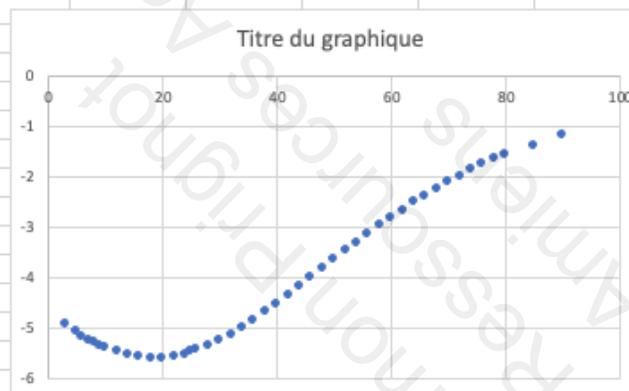
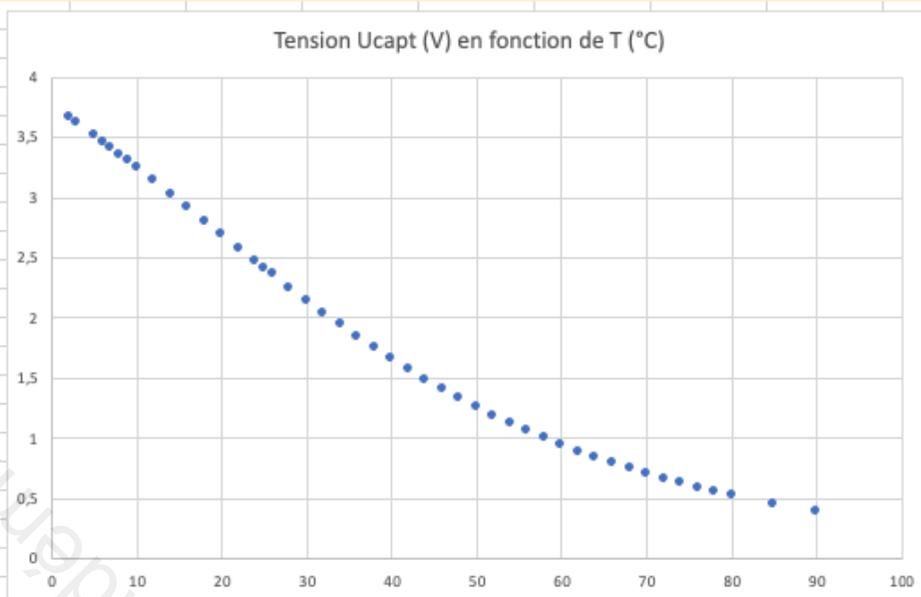
La sensibilité du LM35 est ici toujours meilleure que celle du montage Thermistance/pont.

La modélisation est plus compliquée avec la thermistance. Toutefois avec un microcontrôleur qui fera les calculs, ceci n'est plus gênant.

En ce qui concerne l'ensemble pont/thermistance, les valeurs de V_{cc} et de R doivent être mesurées avec précision pour le calcul. Si V_{cc} varie, U_{th} variera aussi.

Au contraire, d'après les données du LM 35 la tension d'entrée peut évoluer entre 4 et 30V

température en °C	thermistance en Ohms	Uth (V)	variation UTH en mV/°C
2	12907,70751	3,6653572	
3	12276,8018	3,61575812	-4,959908105
5	11116,23978	3,5141854	-5,078636187
6	10582,59328	3,46230286	-5,188253992
7	10077,58993	3,40975422	-5,2548637
8	9599,541747	3,35659069	-5,316352898
9	9146,868592	3,30286538	-5,372530775
10	8718,090755	3,2486331	-5,423228405
12	7926,76375	3,13887387	-5,487961727
14	7215,483438	3,0277762	-5,554883207
16	6575,389355	2,91581477	-5,598071801
18	5998,680682	2,80346748	-5,617364118
20	5478,480627	2,69120747	-5,61300049
22	5008,719241	2,57949536	-5,58560584
24	4584,032026	2,4687722	-5,536158065
25	4387,08586	2,41391241	-5,485978879
26	4199,672092	2,35945327	-5,445913253
28	3851,433938	2,25192287	-5,376520026
30	3535,587247	2,14653014	-5,269636766
32	3248,819287	2,04358608	-5,147203001
34	2988,184751	1,9433617	-5,011219138
36	2751,062006	1,84608718	-4,863725909
38	2535,114894	1,75195206	-4,706755692
40	2338,259339	1,66110627	-4,542289856
42	2158,634109	1,57366181	-4,372222984
44	1994,575202	1,48969512	-4,198334331
46	1844,593367	1,40924979	-4,022266478
48	1707,354355	1,33233957	-3,845510814
50	1581,661563	1,25895159	-3,669399218
52	1466,440738	1,18904957	-3,495101171
54	1360,726506	1,12257706	-3,323625437
56	1263,650484	1,05946055	-3,155825414
58	1174,430773	0,9996124	-2,992407315
60	1092,362673	0,9429336	-2,833940386
62	1016,810462	0,88931623	-2,680868451
64	947,2001117	0,83864578	-2,533522195
66	883,0128248	0,79080315	-2,392131681
68	823,7792968	0,74566637	-2,256838716



Utilisation du LM35



Donner l'algorithme de mesure de température avec le capteur LM35

La mesure est simplifiée avec le LM 35. Il suffit de lire la tension à ses bornes et de multiplier cette valeur par 100.

l'algorithme est pratiquement le même qu'avec la thermistance mais le calcul est simplifié.

```
REPETER EN BOUCLE :
  Mesurer la tension U
  Calculer la température T
  Afficher T
  Attendre 1 seconde
```

Ce qui donne :

```
// Mesure de la température avec le LM35

#define Vcc 5          // Tension d'alimentation

float u;              // Tension aux bornes du capteur
float T;              // Température en °C

void setup() {
  Serial.begin(9600); // Paramétrage du port série
}

void loop() {
  u = analogRead(A0)*5.0/1024; // Lecture tension en V
  T = u*100;                  // Calcul de la température en °C
  // Début affichage

  Serial.print("T = ");
  Serial.println(T);          // Fin affichage
  delay(1000);                // Temporisation de 1s
}
```

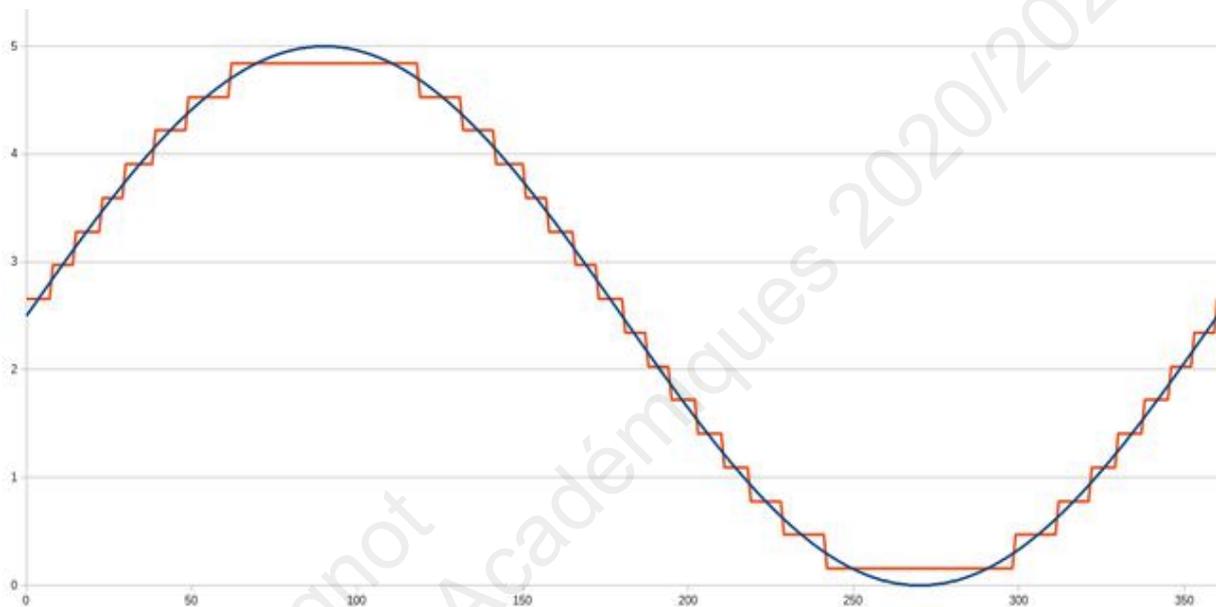
Etude du Convertisseur Analogique Numérique du microcontrôleur

Pour la suite, le projet « Thermorégulation d'un bain marie » se fera avec le capteur LM 35. Pour des raisons matérielle, de simplicité et de coût, la thermistance sera utilisée dans le projet « Régulation de température de la tête d'imprimante 3D »



Le convertisseur CAN du microcontrôleur est-il adapté au LM35 ? (ou l'inverse).

Quelle sera la tension maximale d'entrée du convertisseur si $T=100^{\circ}\text{C}$? En déduire le nombre N maximal en sortie.



Signal analogique et signal numérique

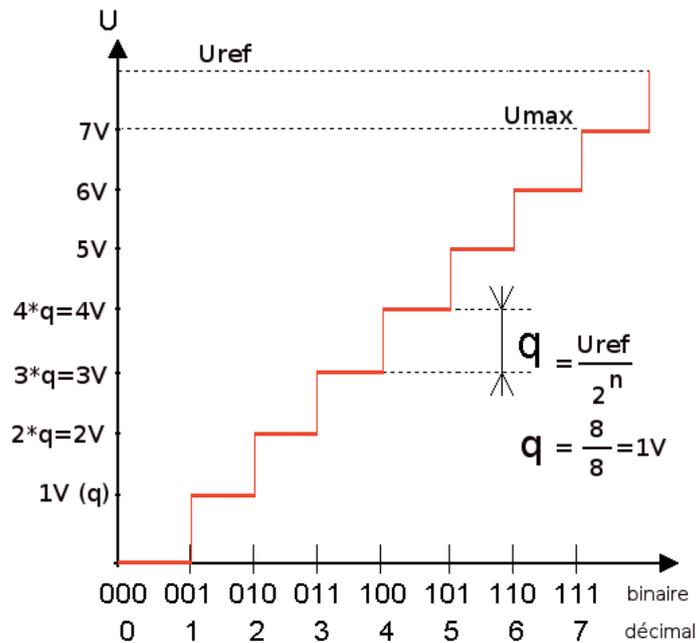
L'idée du Convertisseur Analogique Numérique (CAN) est assez simple. **Elle consiste à associer une valeur numérique (un nombre entier) pour chaque valeur analogique d'une plage de tension bien précise.**

Classiquement sur ce type de microcontrôleur la plage de tension à mesurer va de 0 à 5V (tension d'alimentation) tandis que le nombre de valeurs numériques est lié au nombre de bits du convertisseur.

Pour le CAN Arduino, la conversion se faisant sur 10 bits (binaire) le nombre de valeurs associées sera $2^n=2^{10}$ soit 1024 valeurs (de 0 à 1023).

0 V sera associé à $0\ 000\ 000\ 000_{(2)}$ soit $N=0_{(10)}$

V_{PE} (tension pleine échelle) sera associée à $1\ 111\ 111\ 111_{(2)}$ soit $N=1023_{(10)}$



Exemple pour un convertisseur 3 bits avec tension de référence de 8V

La plus petite variation détectable par le CAN (résolution ou quantum) sera donc (en volt)

$$q = \frac{U_{ref}}{2^n}$$

U_{ref} tension de référence. n = nombre de bits du convertisseur

On constate qu'avec $U_{ref}=5V$ $q=0,0048828$ V soit 4,88 mV.

Mais surtout que si la tension ne dépasse pas 1V (sortie pour 100°C), le nombre maximal en sortie sera $N = 1/q = 204$

Nous utilisons un cinquième de la plage d'entrée du convertisseur !



Comment évolue q si U_{ref} diminue ?

Que vaudrait U_{ref} idéal ? Quelle serait alors la plus petite variation de température détectable ? Quelle relation vous permettra de mesurer la tension en entrée du convertisseur ?

Il est possible de changer la tension U_{ref} du convertisseur sur Arduino :

- en utilisant une tension extérieure de référence sur la patte AREF. Dans ce cas, la commande qui indiquera l'utilisation de cette tension de référence dans le `setup()` est la commande `analogReference(EXTERNAL);`

- Il est possible d'utiliser une tension référence de 1,1 V interne à Arduino. De même on indiquera la commande `analogReference(INTERNAL)`;

C'est cette solution qui sera retenue ici pour une raison de simplicité (pas de circuit supplémentaire pour la tension de référence et la plage convient bien à notre LM35)

Dans ce cas la plus petite variation de tension détectable sera donc $q=1,1/1024 = 1,07 \text{ mV}$!
Soit une variation de température de $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

La tension sera calculée grâce à la relation :

$$U_{CAPT} = N \times \frac{1,1}{1024}$$

ce qui se traduira en ligne de code par :

```
u = analogRead(A0)*1.1/1024;
```

Réflexion sur l'incertitude de type A



Est-ce qu'une mesure toutes les secondes suffira ?

Pour répondre à cette question relevons 10 mesures de la température ambiante en 0,1s. On peut supposer qu'en si peu de temps la température n'évoluera pas.

```
double temperature,tension;
int mesure;

// Boucle Setup pour indiquer le port de communication
void setup() {
  Serial.begin(9600);

  analogReference(INTERNAL);
  pinMode(5,OUTPUT);
  pinMode(A0,INPUT);

  Serial.println("Température (°C)");

  delay (1000);
  for (i=0;i<10;i++){

      mesure=analogRead(A1);

      tension=(mesure*1.1)/1024;

      temperature=tension*100;

      Serial.println(temperature);

      delay(10); // la mesure se fait environ toutes les 10 ms.

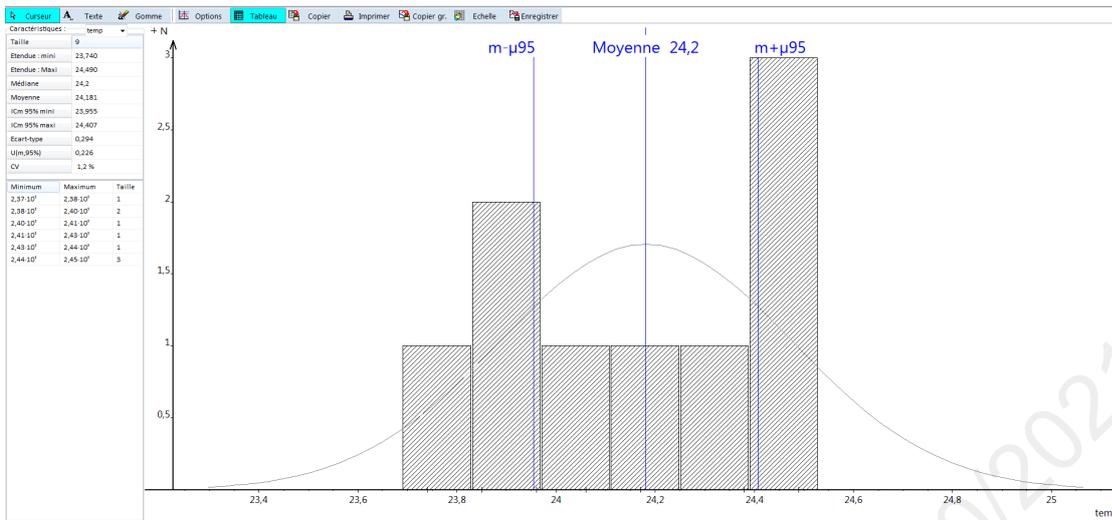
  }
}

void loop()
{
}
}
```

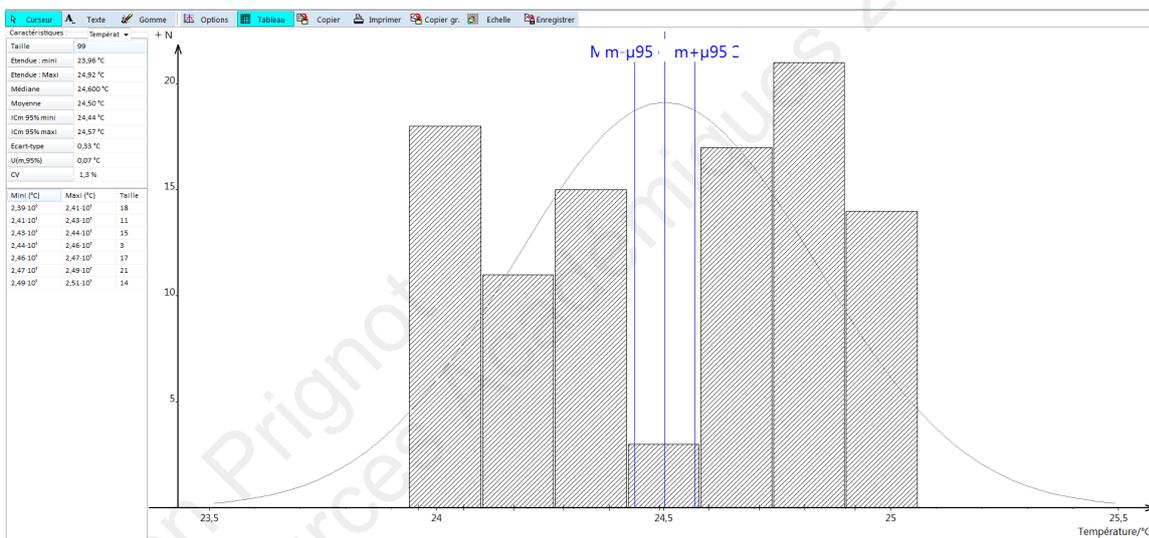
Ouvrons le moniteur série sur Arduino, sélectionnons les valeurs de températures et copions les (CTRL C).

Ouvrir alors Régressi , puis nouveau , presse papier.

Puis ouvrir l'onglet statistique :

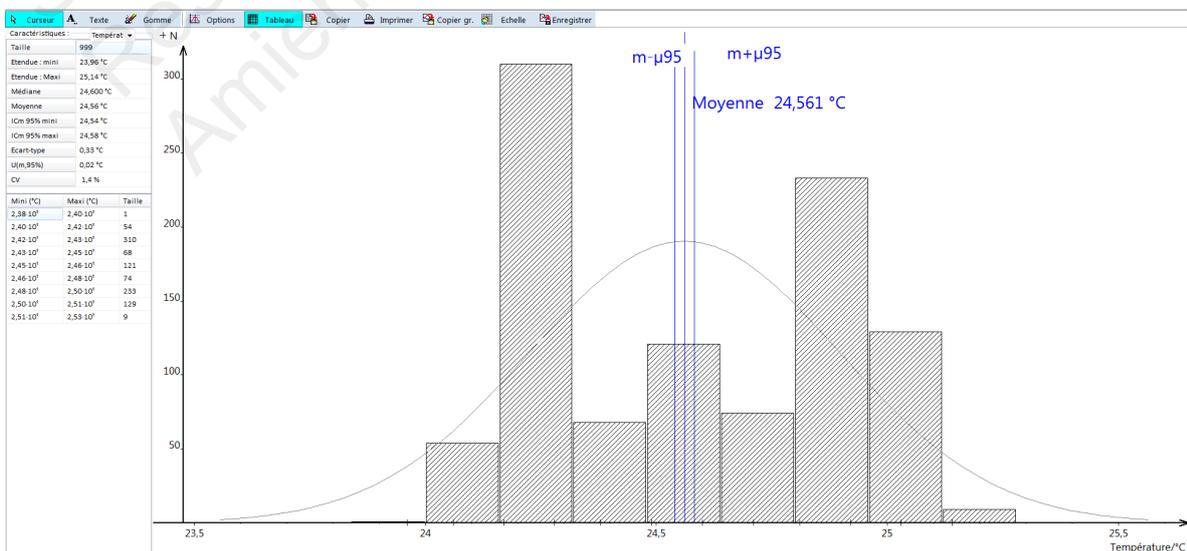


De même pour 100 mesures :



et

et pour 1000 mesures :



On constate bien que l'étendue de mesure est toujours importante et que les mesures ne se situent pas au centre. Le capteur n'est pas fidèle pour le moment.

Soit le morceau de programme suivant :

```

for(int i=0;i<10;i++)
{
  buf[i]=analogRead(A1);
  delay(10);
}
for(int i=0;i<9;i++)
{
  for(int j=i+1;j<9;j++)
  {
    if(buf[i]>buf[j])
    {
      temp=buf[i];
      buf[i]=buf[j];
      buf[j]=temp;
    }
  }
}
avgValue=0;
for(int i=2;i<8;i++)
  avgValue+=buf[i];
tension=(float)avgValue*1.1/1024/6;

```

Si l'on fait afficher les grandeurs mesurées, on obtient :

265 ; 266 ; 264 ; 264 ; 262; 260 ; 265 ; 267 ; 264 ; 265 dans la première boucle

puis 260 ; 262 ; 264 ; 264 ; 264 ; 265 ; 265 ; 266 ; 267 dans la deuxième boucle

et enfin 264 ; 264 ; 264 ; 265 ; 265 ; 265 ; dans la dernière boucle

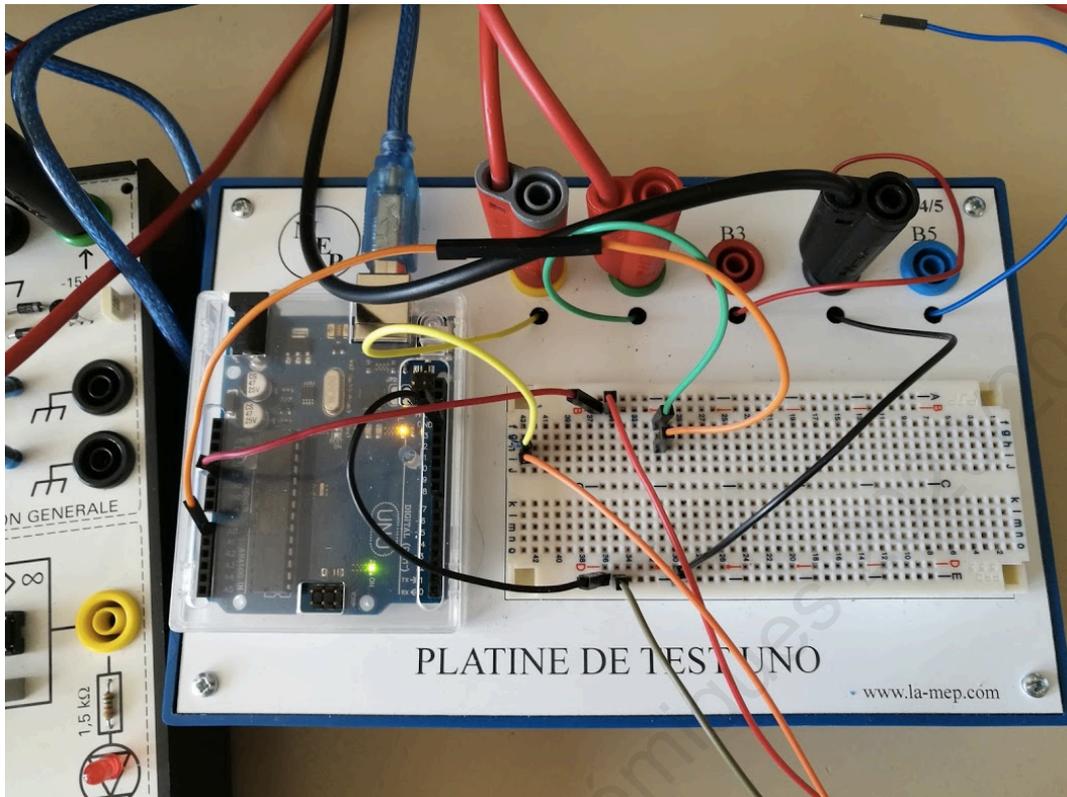


Que réalise ce petit morceau de programme ?

Quel est l'intérêt de l'utiliser pour nos mesures ?

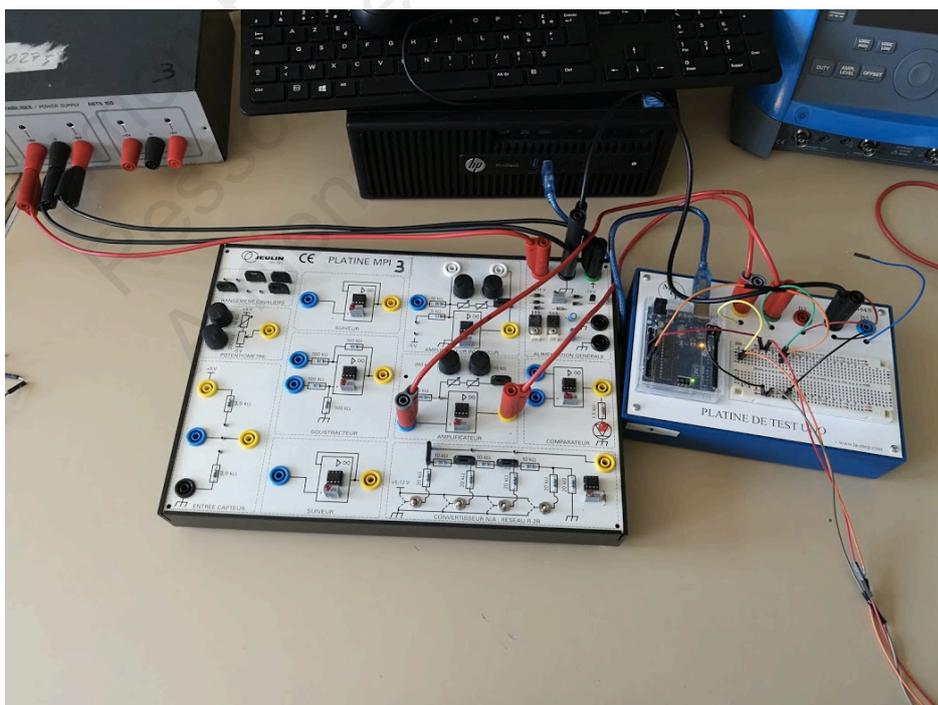
La variation sur les mesures est importante, il va falloir trouver une solution à ce problème pour obtenir des mesures plus précises.

Faire une moyenne de plusieurs mesures est une première approche.

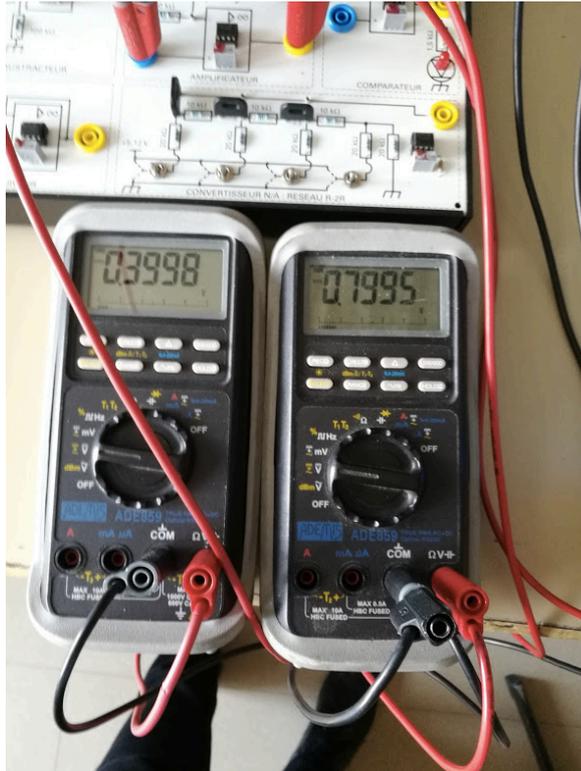


Avec amplificateur non inverseur

La sortie du capteur est connectée sur le fil jaune (entrée de l'ampli).
Le fil vert (sortie de l'ampli) est relié à l'entrée analogique de l'arduino (fil orange)



maquette utilisée pour l'amplificateur



On règle l'amplification de 2 avec précision !

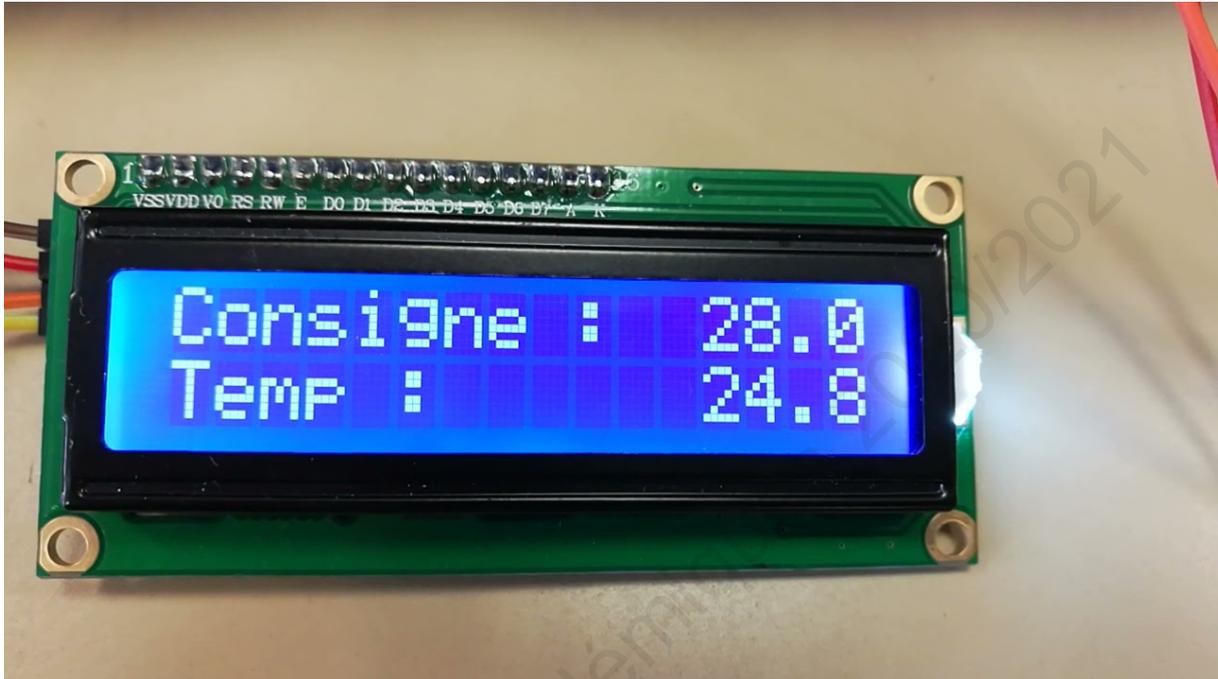
Notre nouvelle sensibilité est de 20 mV/°C

Il faudra prendre en compte cette amplification par 2 dans le calcul de la température.

`temperature= analogRead(A0)*1.1/1024/2;`

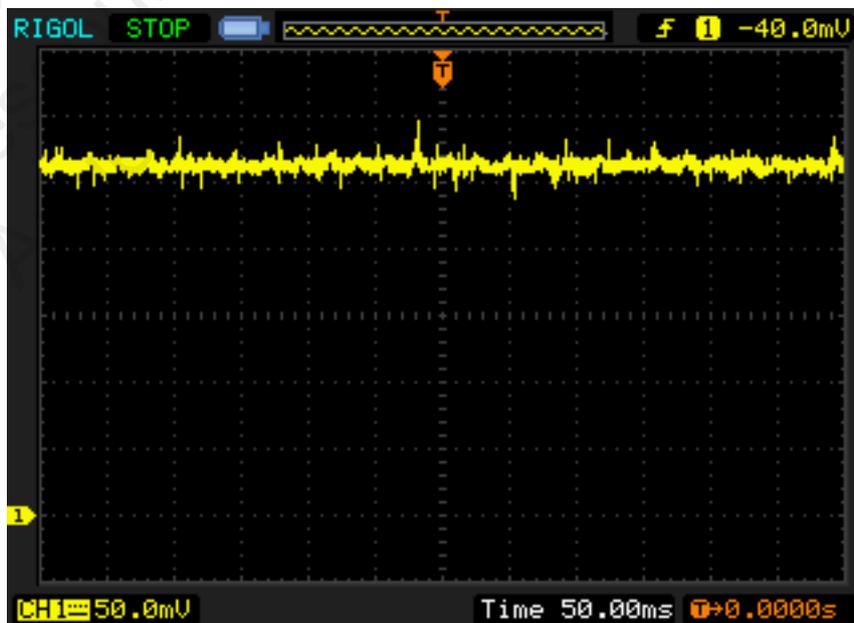
Fonction filtrage

Voici, ce que l'on obtient en visualisant la température ambiante sur un afficheur :



Vidéo : Affichage de la température ambiante.

Afin de mieux appréhender cette instabilité de la température mesurée, on observe à l'oscilloscope la tension à l'entrée du convertisseur.





D'après notre configuration, à combien estimez-vous la température dans la pièce ?
 Décrire la qualité du signal observé. Est ce que cela peut être gênant pour nos mesures ?

La tension qui devrait être continue est loin de l'être.

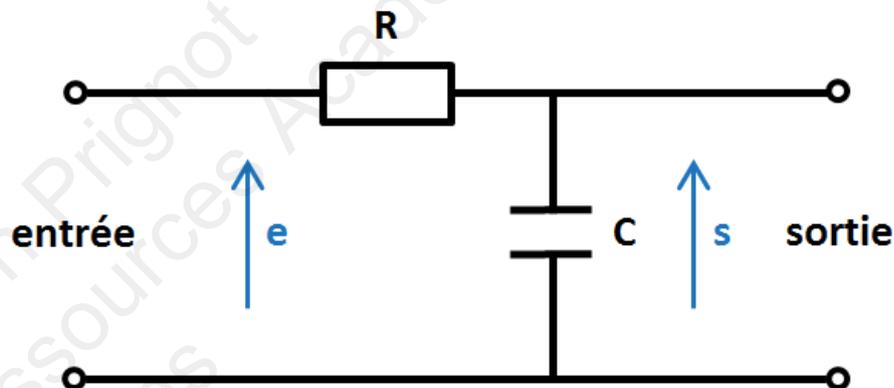
On observe des variations qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de millivolts. Ce qui équivaut à 1 voir 2 °C !

Notre montage est sensible aux bruits et parasites. Afin d'éliminer les parasites, il convient de placer un filtre.

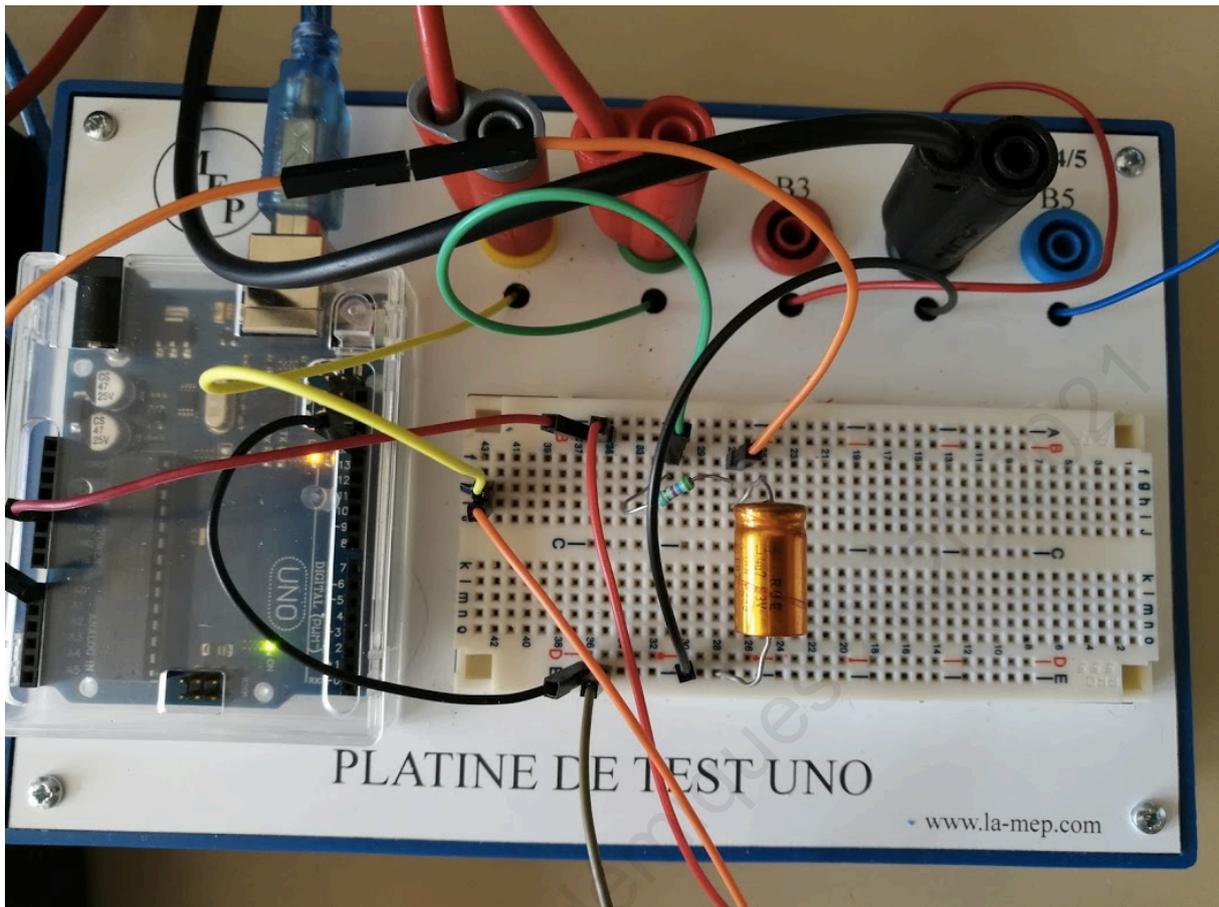


Quel type de filtre proposez-vous ?
 Quelle serait sa fréquence de coupure ?
 Réalisez le montage.

Afin de ne conserver que la composante continue du signal (valeur moyenne), il convient de placer un filtre passe-bas avec une fréquence de coupure proche du Hertz.
 On choisit un classique filtre RC que l'on monte en sortie de l'amplificateur.

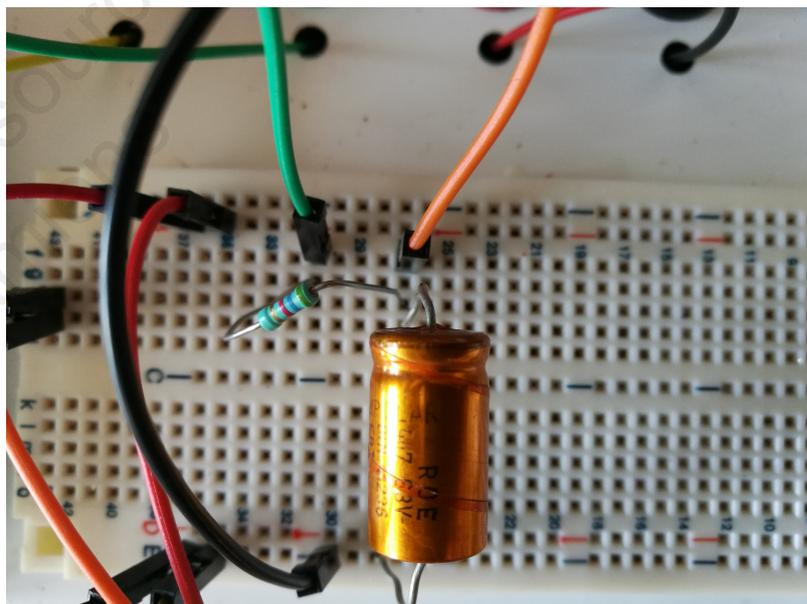


$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$



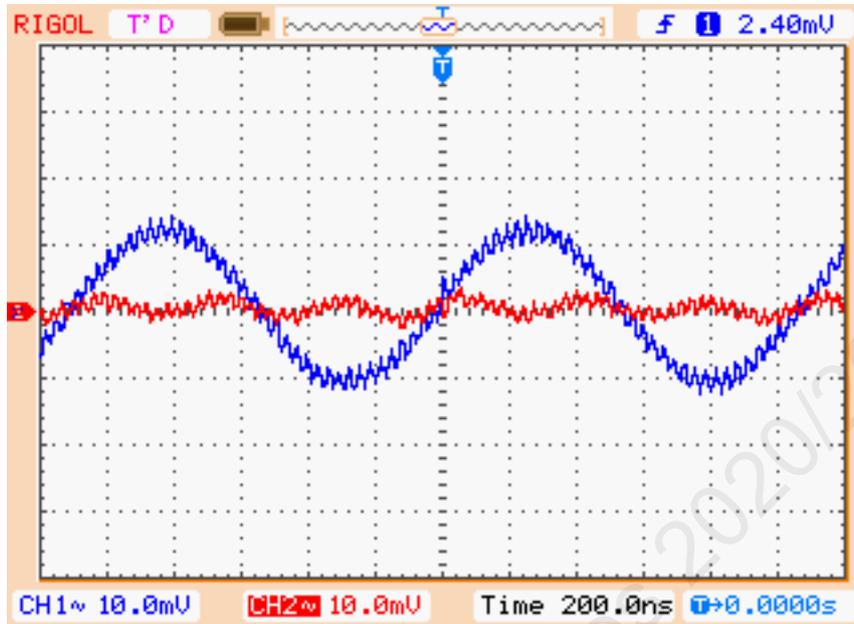
Ajout du filtre RC

Sur cette photo, la sortie du filtre (fil vert) est connectée sur l'entrée du circuit RC. La mesure de la tension par le convertisseur se fait aux bornes du condensateur (fil orange)



Gros plan sur le circuit RC

Voici ce que l'on peut observer en entrée (CH1) et en sortie du filtre passe bas (CH2) :
(On observe uniquement la composante alternative ici . Mode AC)



Conclure sur l'efficacité du filtre.

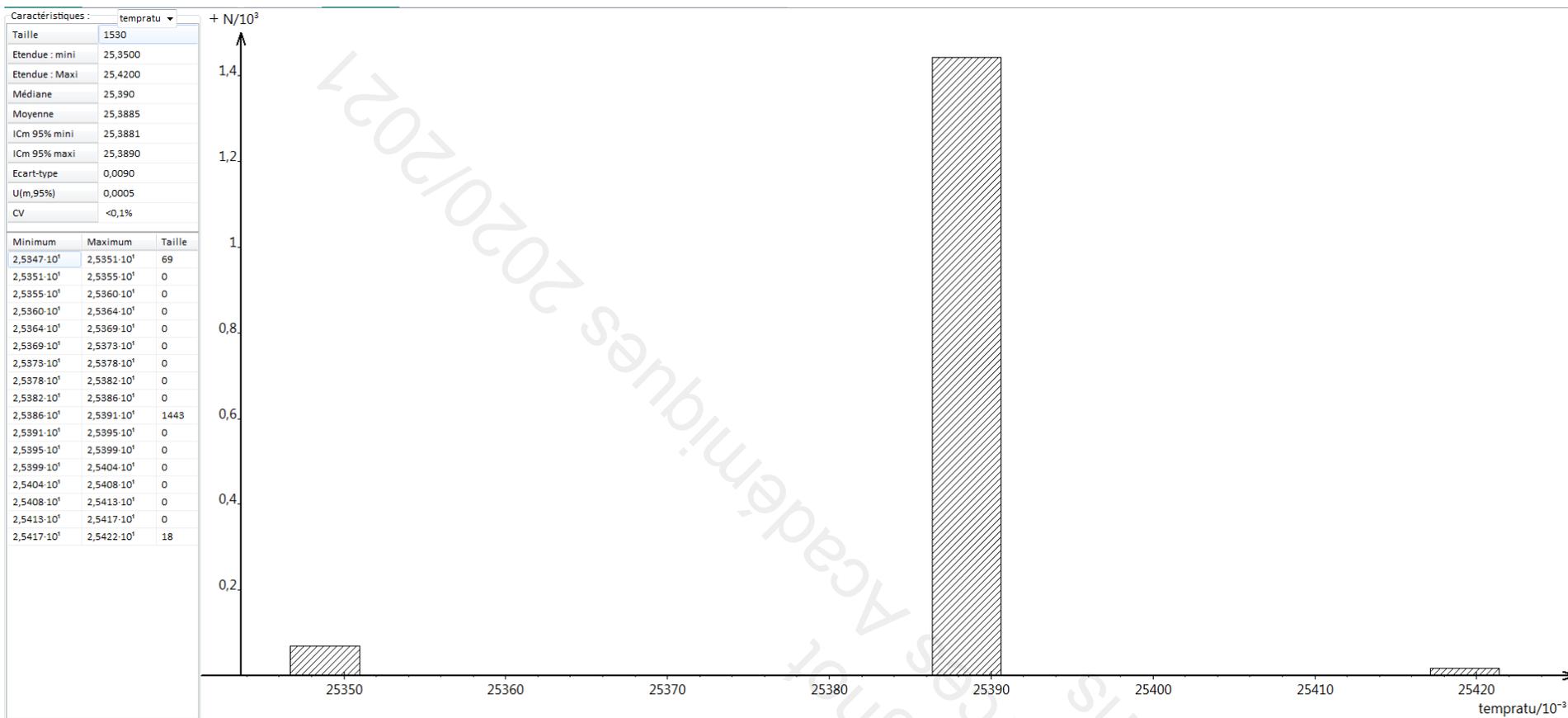
COM5	
6.00;25.53	
7.00;24.60	
8.00;24.60	
9.00;24.56	
10.00;25.21	
11.00;25.28	
12.00;24.67	
13.00;24.60	
14.00;25.71	
15.00;25.71	
16.00;25.53	
17.00;25.53	
18.00;25.57	
19.00;25.24	
20.00;24.81	
21.00;25.24	
22.00;25.32	
23.00;24.92	
24.00;24.99	
25.00;24.96	
26.00;25.32	
27.00;24.56	
28.00;25.49	
29.00;25.49	
30.00;24.96	
31.00;24.85	
32.00;24.67	
33.00;24.89	
34.00;24.81	

Défilement automatique Afficher l'horodatage

Sans filtre RC

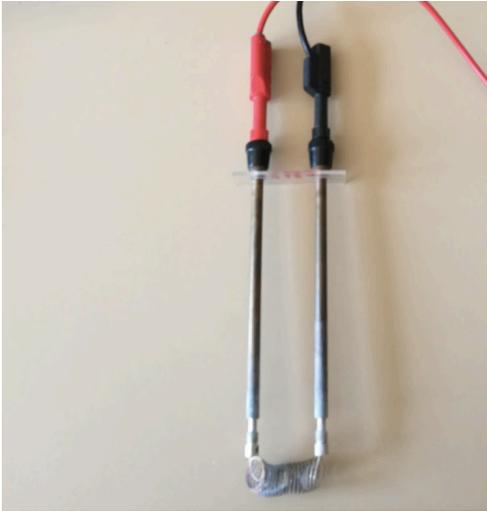
COM5	
15.00;25.10	
16.00;25.10	
17.00;25.10	
18.00;25.07	
19.00;25.10	
20.00;25.07	
21.00;25.07	
22.00;25.07	
23.00;25.10	
24.00;25.10	
25.00;25.10	
26.00;25.10	
27.00;25.10	
28.00;25.10	
29.00;25.07	
30.00;25.10	
31.00;25.10	
32.00;25.07	
33.00;25.07	
34.00;25.10	
35.00;25.10	
36.00;25.07	
37.00;25.07	
38.00;25.10	
39.00;25.07	
40.00;25.10	
41.00;25.07	
42.00;25.07	
43.00;25.07	

Avec filtre RC



Circuit de puissance : Estimation de la puissance de chauffe

Afin de chauffer le bain, nous utilisons ici une résistance de type thermoplongeur.



Résistance chauffante

Pour des questions de sécurité, la puissance sera limitée. Le principe reste toutefois le même pour des puissances plus élevées mais avec un dimensionnement des composants adapté.



Même si nous sommes protégés électriquement avec la basse tension, la résistance va chauffer à rouge et il y a donc un risque de brûlure important !!

Toute utilisation de la résistance sous tension se fera avec l'accord du professeur.

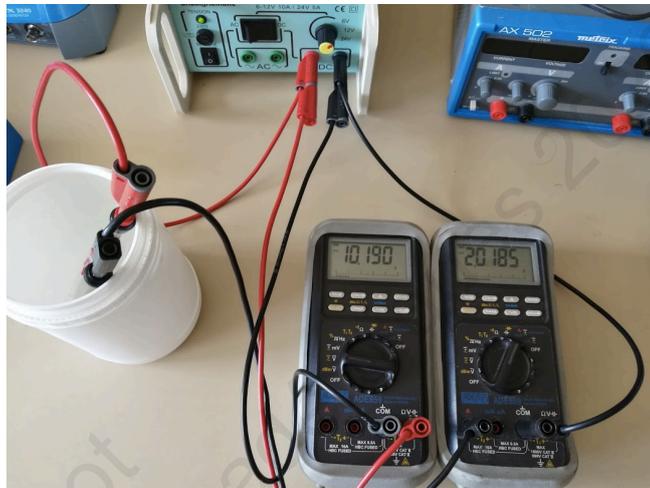
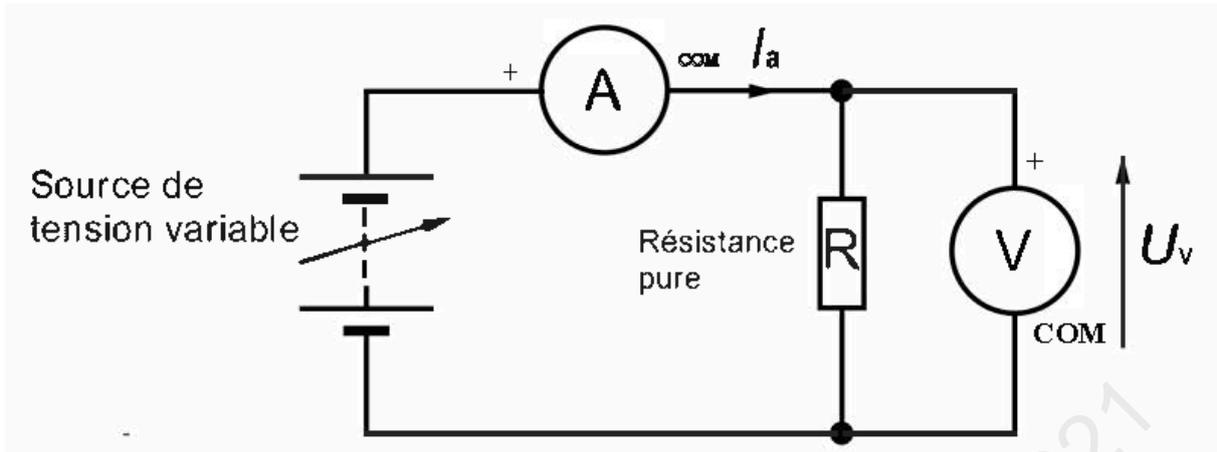
De même, il faudra éviter de placer le capteur trop près de la résistance.



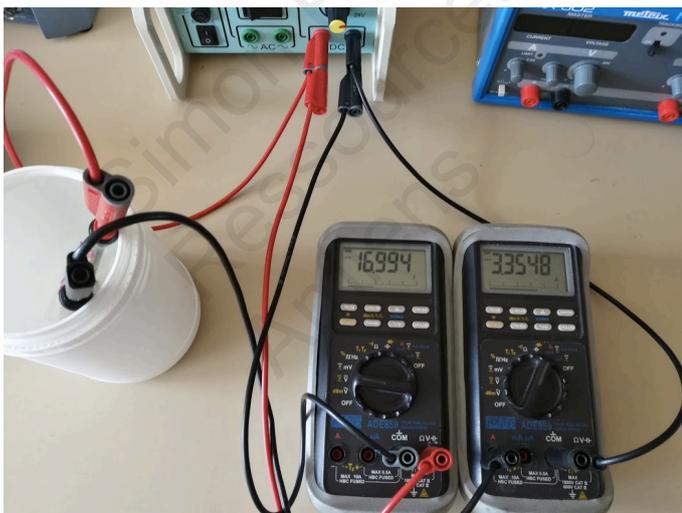
Réalisez un protocole permettant d'en déduire la puissance consommée par la résistance lorsqu'elle est alimentée par le générateur dédié.

Réalisez la mesure en présence du professeur.

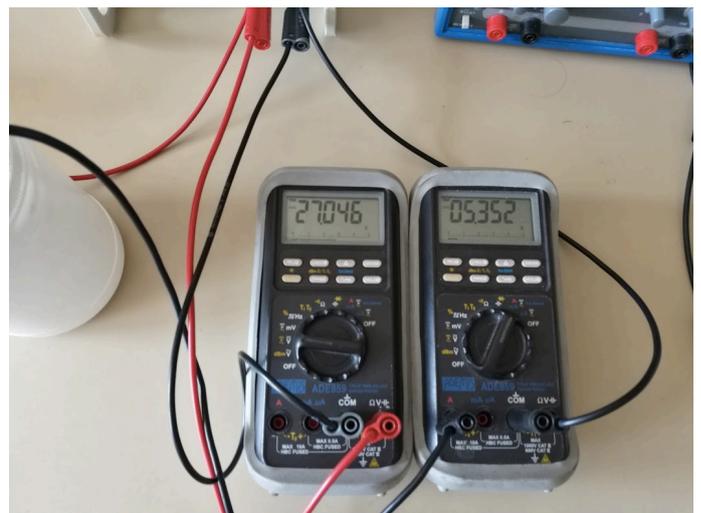
Notez les valeurs mesurées et calculez cette puissance.



Position 1 :Le générateur est pourtant sur la position 6V !! $P= 20W$



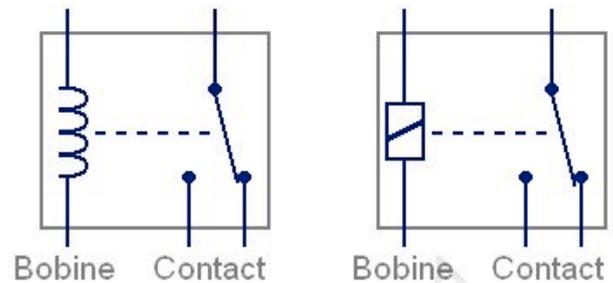
Positon 2: sous 12 V (sic!), la puissance est de $P=57 W$



Position 3 : $P= 144 W$!

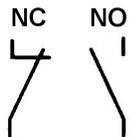
Circuit de puissance : Etude du relais

Le relais commandé est le suivant :



Symboles du relais

- Un relais est composé principalement d'un électroaimant, qui lorsqu'il est alimenté, transmet une force à un système de commutation électrique : les contacts.
- L'électroaimant (la bobine) peut être, suivant les spécifications et besoins, alimenté en TBT (Très Basse Tension) (moins de 12 V, 24 V, 48 V) continu ou alternatif ou en BT (Basse Tension) (230 V, 400 V).
- Le système de commutation peut être composé d'un ou plusieurs interrupteurs simple effet appelés contacts normalement ouverts (NO) ou normalement fermés (NF ou NC). Ces commutateurs sont adaptés aux courants et à la gamme de tensions à transmettre à la partie puissance.



Les caractéristiques techniques du relais sont inscrites sur celui-ci.

 Expliquez ces données techniques et donner votre avis sur son utilisation avec la carte arduino et le thermoplongeur.

En réalité ici, rien n'est indiqué pour le fonctionnement de la charge en courant continu. 250V/10 A en alternatif, la puissance semble confortable. Toutefois en cherchant un peu sur internet, on relève un fonctionnement plus limité en continu : 30 V/10A soit 300 W. Ce qui est très acceptable ici.

Attention toutefois, l'utilisation d'un relais comme celui-ci sur une sortie Arduino semble possible puisque la tension de déclenchement est de 5V.

Cependant, ce type de composant est à la limite de ce que peut commander le microcontrôleur Arduino en terme de puissance. L'intensité classique recommandée pour une sortie est de l'ordre de 20 mA et 200mA pour l'ensemble des sorties. Ici nous atteignons 60 mA pour la commande du relais, ce qui est vraiment limite.

Si le nombre de relais augmente il faudra prévoir un circuit de puissance pour les commander.

Le branchement de ce relais est très classique avec une borne VCC, une borne de masse et une borne de commande SIG reliée à la sortie numérique de l'Arduino.

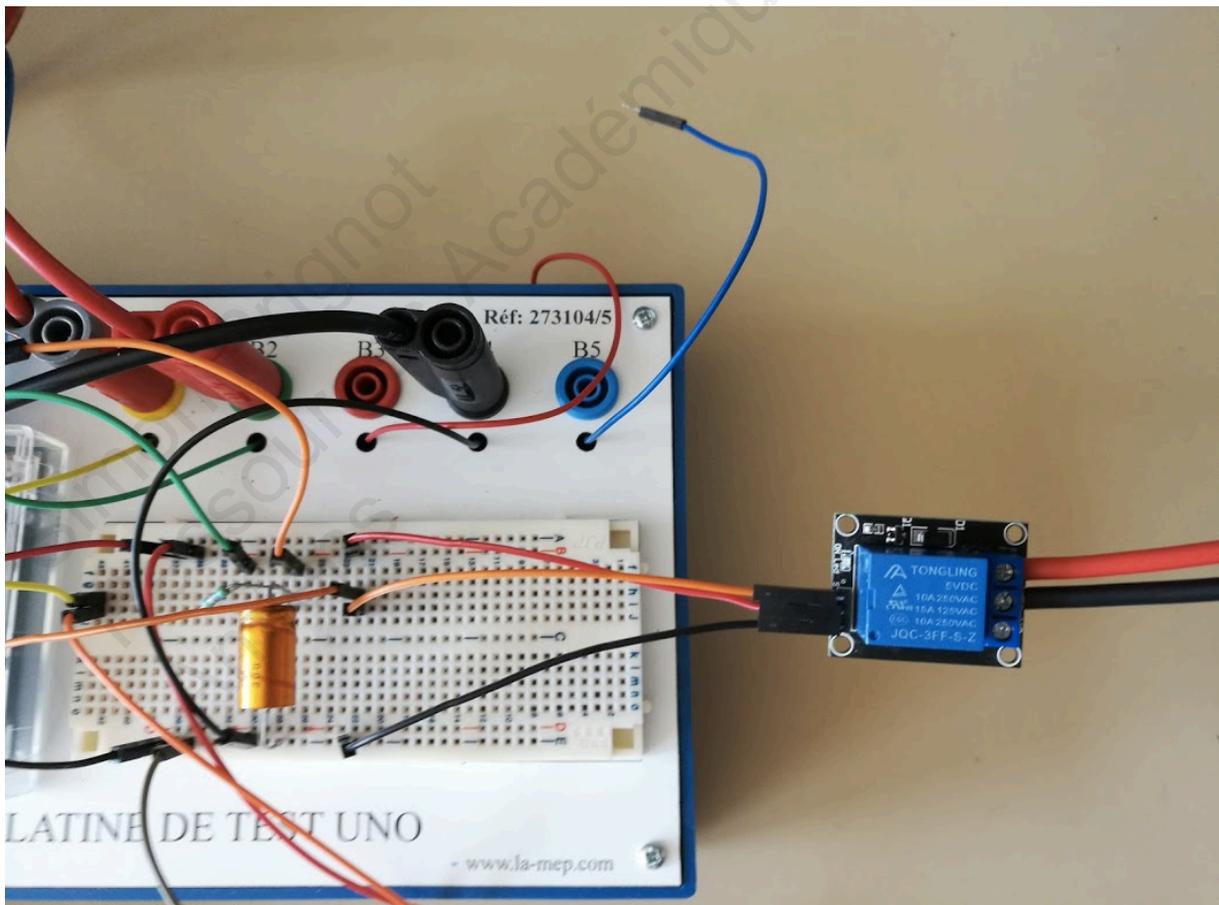
Ici, nous avons choisi d'utiliser la sortie normalement fermée(NC) lors de la chauffe pour éviter d'alimenter le relais lors de celle-ci. **La commande coupera l'alimentation.**



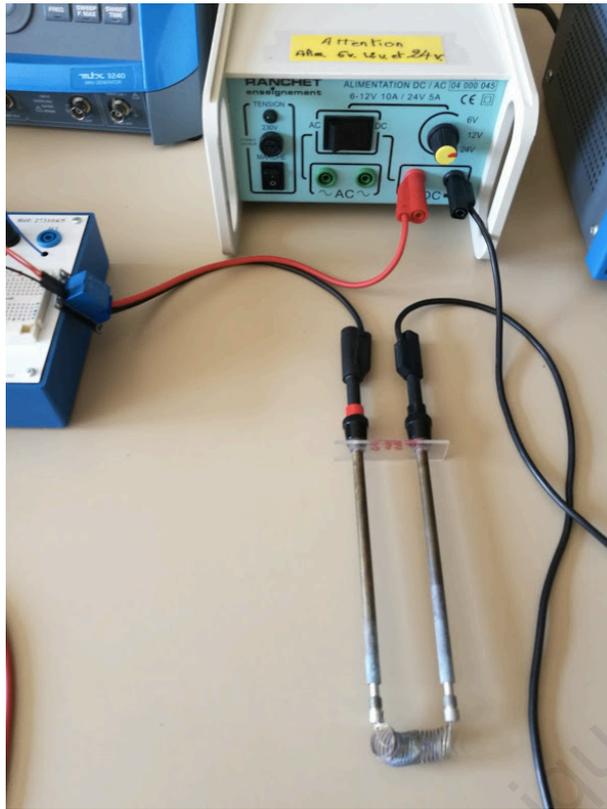
En haut, les 3 bornes d'entrée : fil noir pour la masse, fil rouge pour VCC et fil orange sur la sortie de commande D4.

Dans la partie inférieure, l'interrupteur est normalement fermé entre le com et NC . Un 0V en entrée laissera l'interrupteur fermé, tandis qu'un 5V ouvrira l'interrupteur et coupera l'alimentation du thermoplongeur.

Bien sûr le fonctionnement entre NO et COM est inversé.



Branchement de la partie commande (coté Arduino)
Le câble orange est relié à la sortie D4 de l'Arduino



Branchement coté puissance
(Thermoplongeur)



Ecrire un petit programme permettant de vérifier l'enclenchement du relais et le bon fonctionnement de cette commande de puissance.

Ici, faire comprendre que le programme qui permet d'enclencher le chauffage (ou tout autre appareil domestique si on veut faire un lien avec la domotique) est finalement similaire à celui pour allumer une LED.

```
void setup() {
  // initialiser la broche D4 comme une sortie
  pinMode(4, OUTPUT);
}

// Cette partie peut être effectuée une seule fois dans le setup() pour un test

void loop() {
  digitalWrite(4, HIGH); // Place la sortie digitale 4 à l'état haut, attention si le relais est branché sur NC, le chauffage est arrêté
  delay(10000);          // observation pendant 10 secondes
  digitalWrite(4, LOW);  // Place la sortie digitale 4 à l'état bas, si le relais est branché sur NC, le chauffage est en fonctionnement.
  delay(1000);          // observation pendant 10 secondes
}
```

Régulation de température en comparateur



Elaborer l'algorithme permettant de réguler la température à 28°C en prenant en compte nos évolutions.

REPETER EN BOUCLE :

```

Mesurer 10 fois la tension U
Calculer une moyenne de U
Calculer la température T associée
Afficher T
Si T est inférieur à la température de consigne on met la
sortie D4 à l'état bas (chauffe)
Sinon D4 est placé à l'état haut (interrupteur relais
ouvert)
Attendre 1 seconde
  
```

Il nous reste à **joindre la partie capteur et la partie commande** pour faire notre première régulation !

Le programme « Régulateur, moyenne et comparateur pour relais » est donné en annexe.

Voici la petite partie concernant la commande :

```

if(consigne>temperature){
    commande=0;}
else {commande=1;
    }
digitalWrite(4, commande);
}
  
```

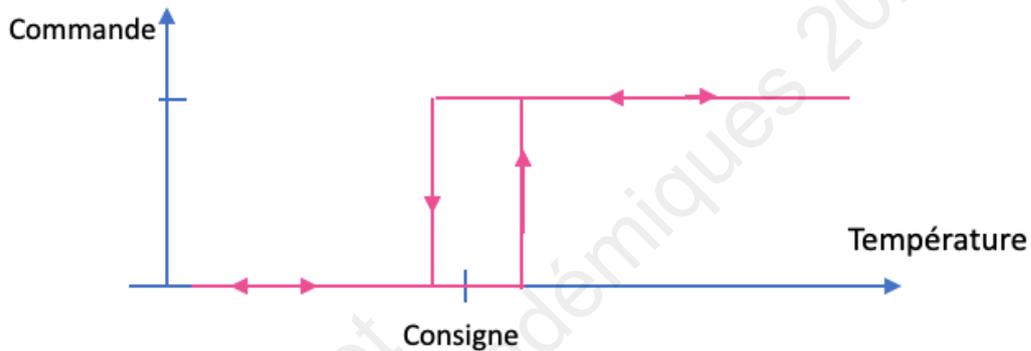
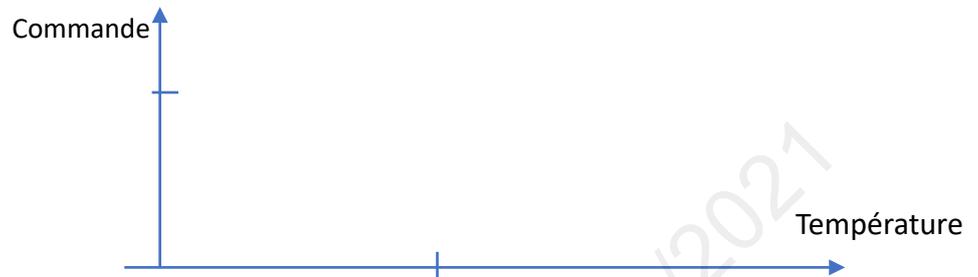


En milieu industriel, on constate que le fonctionnement est perturbé. En effet le relais se déclenche de façon intempestive ce qui risque de provoquer sa destruction à terme. Emettez une hypothèse, ainsi qu'un possible aménagement de la commande.

Même si l'utilisation de la moyenne limite ce problème, les machines environnantes peuvent provoquer des perturbations de la mesure autour de la consigne ce qui provoquera le déclenchement aléatoire du relais. Mais même « naturellement », le relais risque de commuter assez suffisamment pour juger qu'il risque une usure prématurée. Sans compter les pics de courant appelé à chaque commutation.



Un ami vous suggère de vous donner une marge autour de la consigne de fonctionnement en utilisant un comparateur 2 seuils. Complétez la fonction de transfert qui vous conviendrait.



Elaborez un algorithme qui réalisera cette commande à 2 seuils.

```
Tb=27,5;Th=28,5;
flag=1;
REPETER EN BOUCLE
Si T<Tb on chauffe (D4=0) flag=1
Si T>Th on ne chauffe pas (D4=1) flag=0
Si Tb<T<Th et flag=1 on chauffe (D4=0)
Si Tb<T<Th et flag=0 on ne chauffe plus (D4=1)
```



Vérifiez le bon fonctionnement du montage. Quel est le principal inconvénient de ce type de régulation dans notre situation.

On cherche à obtenir une température la plus stable possible. Ce qui n'est pas possible avec ce type de fonctionnement.

Commande en PWM

Afin de corriger le problème lié au montage précédent, nous désirons adapter la puissance de chauffe. (Chauffer fort lorsque l'on est éloigné de la consigne, moins lorsqu'on s'en approche).

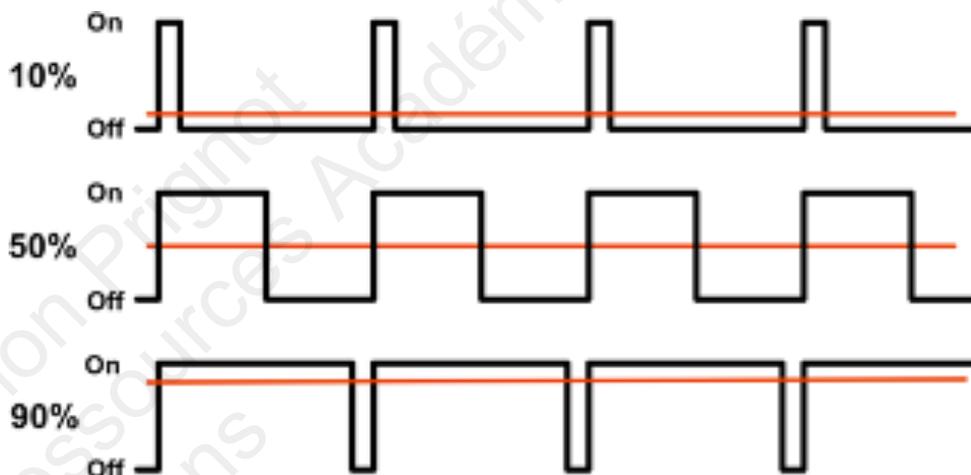
Pour cela nous allons moduler le temps d'alimentation de la résistance en fermant et ouvrant régulièrement l'interrupteur.

Modulation de largeur d'impulsion (PWM ou MLI)

L'interrupteur étant fermé ou ouvert, **le seul moyen de modifier l'énergie fournie est de jouer sur le temps de fermeture et d'ouverture de l'interrupteur** : le principe de la PWM (MLI en français) est de cadencer à fréquence rapide (490 Hz pour Arduino Uno), l'ouverture et la fermeture de l'interrupteur électronique .

La fréquence de fermeture et d'ouverture restera la même, seul le rapport cyclique α sera modifié :

$$\alpha = \frac{\text{Temps de fermeture}}{\text{Période}}$$



La puissance délivrée sera donc proportionnelle à α .

La réalisation de cette commande PWM est aisée avec Arduino.

ATTENTION toutefois, toutes les sorties digitales ne sont pas PWM. Elles sont signalées par le signe tilde ~. Elles correspondent aux broches 3, 5, 6, 9, 10 et 11 sur la carte Arduino Uno.

La fonction qui permet d'utiliser cette commande PWM est `analogWrite()`. Elle prend 2 arguments :

Le premier est le numéro de la broche où l'on veut générer la PWM

Le second argument représente la valeur du rapport cyclique à appliquer. Malheureusement on n'exprime pas cette valeur en pourcentage, mais avec un nombre entier compris entre 0 et 255. Ce nombre est proportionnel au rapport cyclique et donc à la puissance délivrée.

Ainsi, pour un rapport cyclique de 0% nous enverrons la valeur 0, pour un rapport de 50% on enverra 127 et pour 100% ce sera 255.

Exemple :// on met un rapport cyclique de $107/255 = 42\%$ en sortie D3

```
analogWrite(3, 107);
```

L'utilisation du relais est-elle envisageable pour ce type de fonctionnement ?



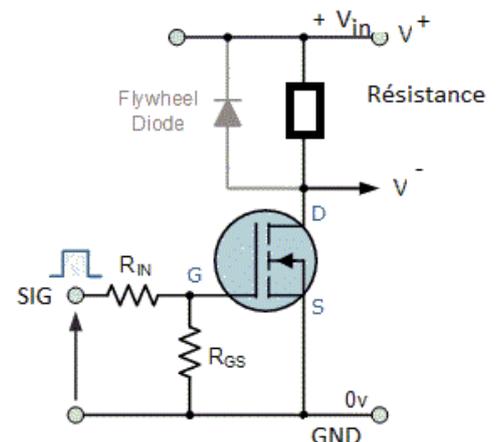
Pourquoi est-il nécessaire de travailler à une fréquence élevée ? (Pensez à la commande de vitesse d'un moteur à courant continu. Que se passerait-il si la commande était trop lente ?)

Le relais ne résisterait pas mécaniquement à une commande aussi rapide. Il est important que la commande se fasse rapidement afin la grandeur commandée n'ait pas le temps de varier entre la phase d'alimentation et la phase sans apport d'énergie. (un peu comme une lampe alimentée en sinusoïdal mais que l'on voit briller toujours de la même façon).

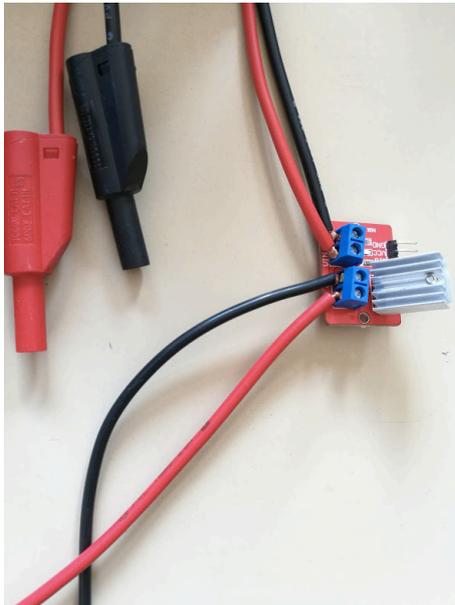
Utilisation d'un transistor MOSFET

Sans entrer dans ses détails de fonctionnement, on retiendra que **le transistor MOSFET est équivalent à un interrupteur qui serait commandable en tension pouvant fonctionner à haute fréquence.**

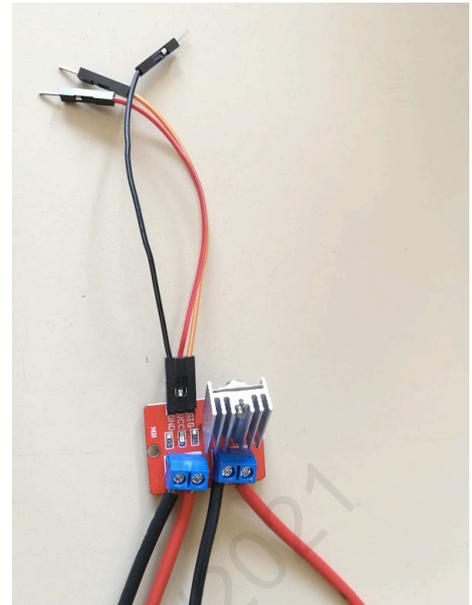
Une tension de 5V sur sa grille (SIG sur le module Mosfet Arduino) fermera l'interrupteur
Une tension de 0V sur sa grille, ouvrira l'interrupteur.



Principe de fonctionnement du module Mosfet avec résistance



Partie puissance, on adapte les câbles



La partie commande est classique



D'après les documents, quelle doit être la valeur de la commande pour avoir 100% de chauffe ? 50 % ? 25 % ? 0 % ?

Le signal de commande varie entre 0 et 255 pour une puissance de chauffe de 0 à 100 %



Le module MOSFET prend la place du relais sur la platine.

Principe de la régulation avec correcteur proportionnel

L'idée générale de la régulation proportionnelle est que :

Plus la température est éloignée et en dessous de la consigne, plus il faut chauffer fort.

Plus la température se rapproche de la consigne, moins on chauffe.

Dès que la température dépasse la consigne on arrête de chauffer.

Pour cela , on commence par **estimer l'erreur qui est l'écart entre la consigne et la température mesurée.**

La commande PWM s'obtient en multipliant cette erreur par un coefficient appelé Gain.

On limite ensuite la valeur de la commande dans la plage autorisée (entre 0 et 255).

L'algorithme en pseudo code se résume à :

```
//Au début du programme il faut initialiser les variables
Consigne = 28
Gain = 10 (par exemple)
//dans la boucle principale du programme qui se répète toutes les secondes
Erreur = Consigne - Temperature
Commande = Gain * Erreur
si (Commande>255) alors Commande = 255
si (Commande<0) alors Commande = 0
Signal_PWM=Commande
```



Réalisez ce code dans un programme. Testez le montage et observez l'évolution de la température et de la commande.

Toute la difficulté réside dans le choix du Gain. En augmentant celui-ci, le système devient plus réactif mais aussi plus instable. En diminuant le Gain, la réponse du système est plus molle mais plus stable ! Il y a un compromis à trouver ! (en particulier pour la tête d'imprimante)

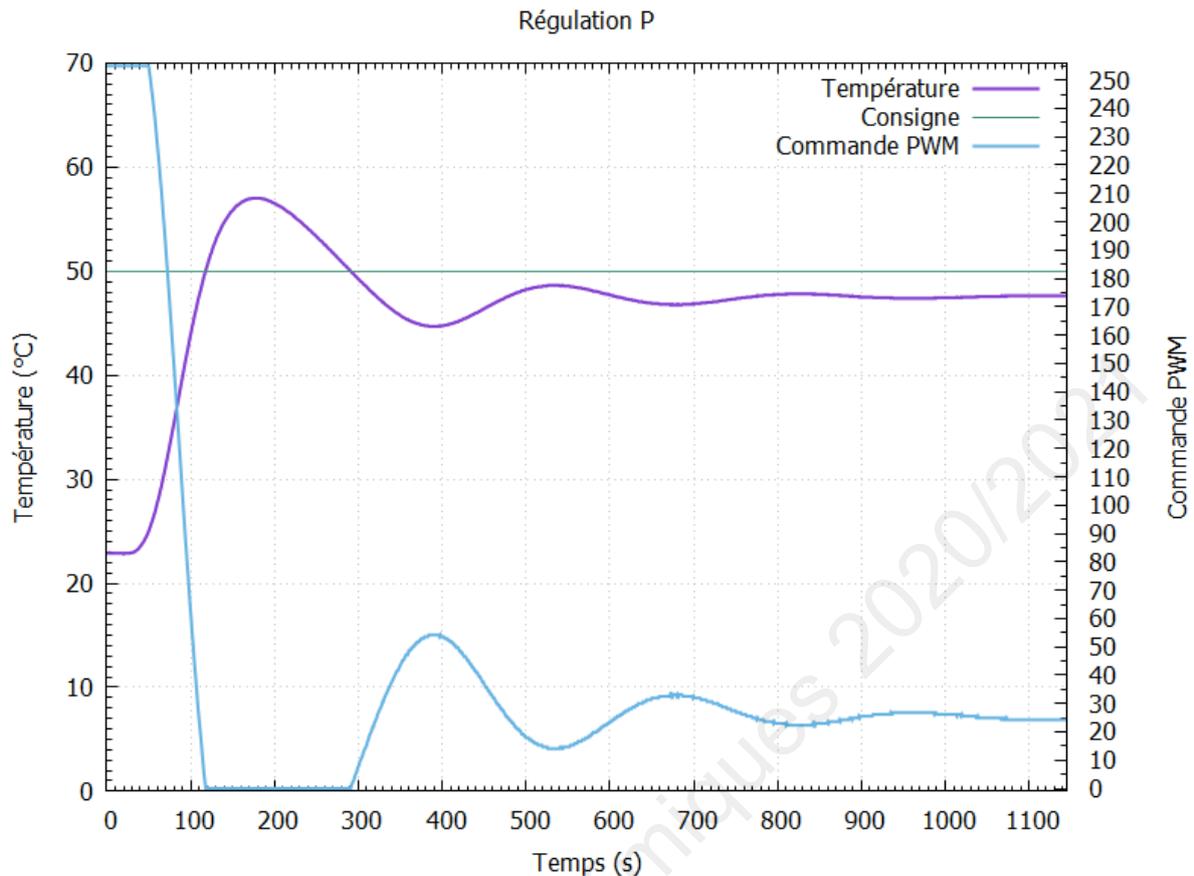
Analyse du résultat

On observe que :

Le temps de montée a été un peu rallongé .

Les oscillations finissent par s'amortir et la température se stabilise. L'écart entre la consigne est cette valeur de stabilisation s'appelle l'erreur statique :

La courbe de la commande PWM finit elle aussi par se stabiliser autour d'une valeur. Cette valeur de puissance permet de stabiliser la température en compensant tout juste les pertes thermiques du système. La chaleur amenée par la résistance compense tout juste les pertes de chaleur. Il manque donc un petit "chouya" pour que la température se stabilise sur notre valeur de consigne



Essai réalisé avec la tête d'imprimante.

Evolution de la gestion du temps dans Arduino :

Les lignes de codes commencent à s'ajouter les unes aux autres. Et **nous devons gérer plusieurs actions** avec le microcontrôleur. (mesure du capteur, actionner la PWM..)

La commande `delay()` qui était suffisante jusqu'à maintenant n'est plus satisfaisante pour gérer la notion de temps. En effet cette commande établit une pause dans le programme en arrêtant toutes les instructions **et donc toutes les actions** pendant un certain temps.

De plus, si l'on veut faire un échantillonnage précis (par exemple toute les 10 microsecondes) on ne peut plus négliger le temps nécessaire à la réalisation des instructions devant la pause de 10 microsecondes.

Pour ces raisons, **nous utiliserons les instructions `millis()` et `micros()`** qui utilisent une horloge interne du microcontrôleur.

Pour remplacer ce code par un structure avec `millis()`, l'idée est de créer une variable afin de conserver en mémoire à chaque itération la valeur de temps écoulé puis de la comparer à la valeur de temps actuelle.

Principe de la régulation avec correcteur proportionnel Intégral

Afin de réduire l'erreur statique à zéro, on va ajouter à notre régulateur Proportionnel le terme I comme Intégrale. L'idée générale est la suivante :

On veut qu'une erreur même minime, mais qui se répète "longtemps" dans le temps, finisse par peser dans la commande PWM.

Pour mettre en oeuvre cette idée, on va sommer les erreurs à chaque itération de notre boucle de régulation. Les erreurs vont ainsi s'accumuler en positif tant que la température est en dessous de la consigne et en négatif si elle est au dessus. Il suffit d'introduire cette somme des erreurs dans notre calcul de la commande en la multipliant par un coefficient noté Ki

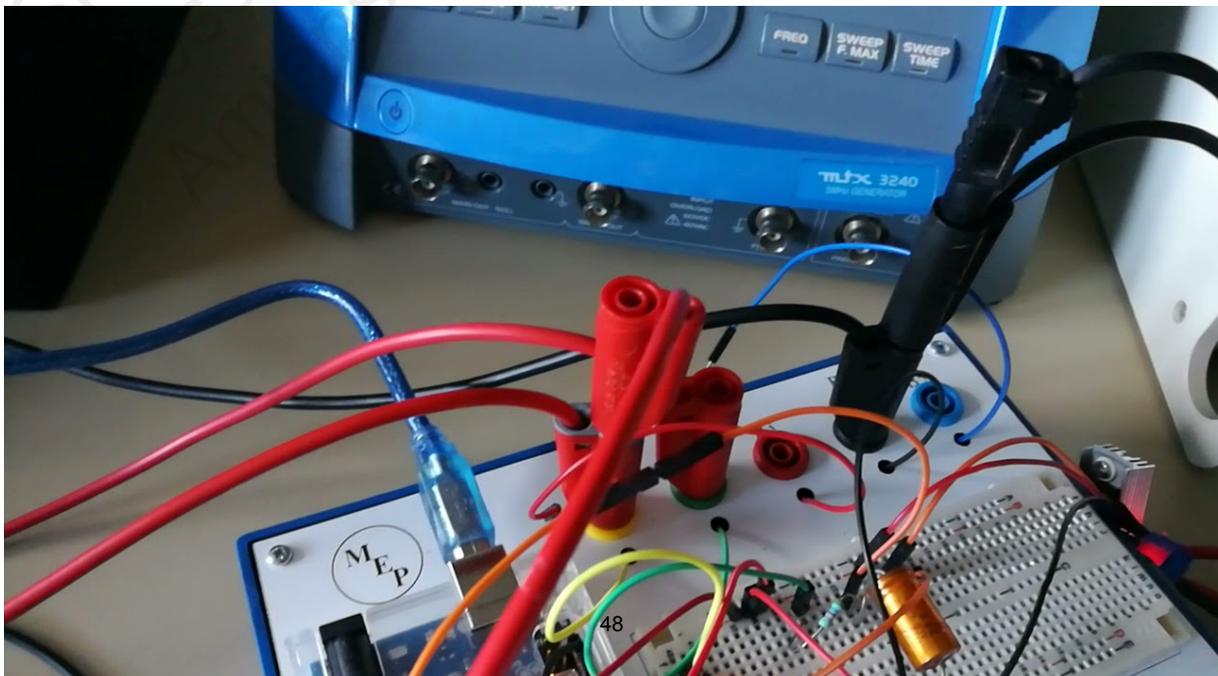
Le pseudo-code qui réalise cela :

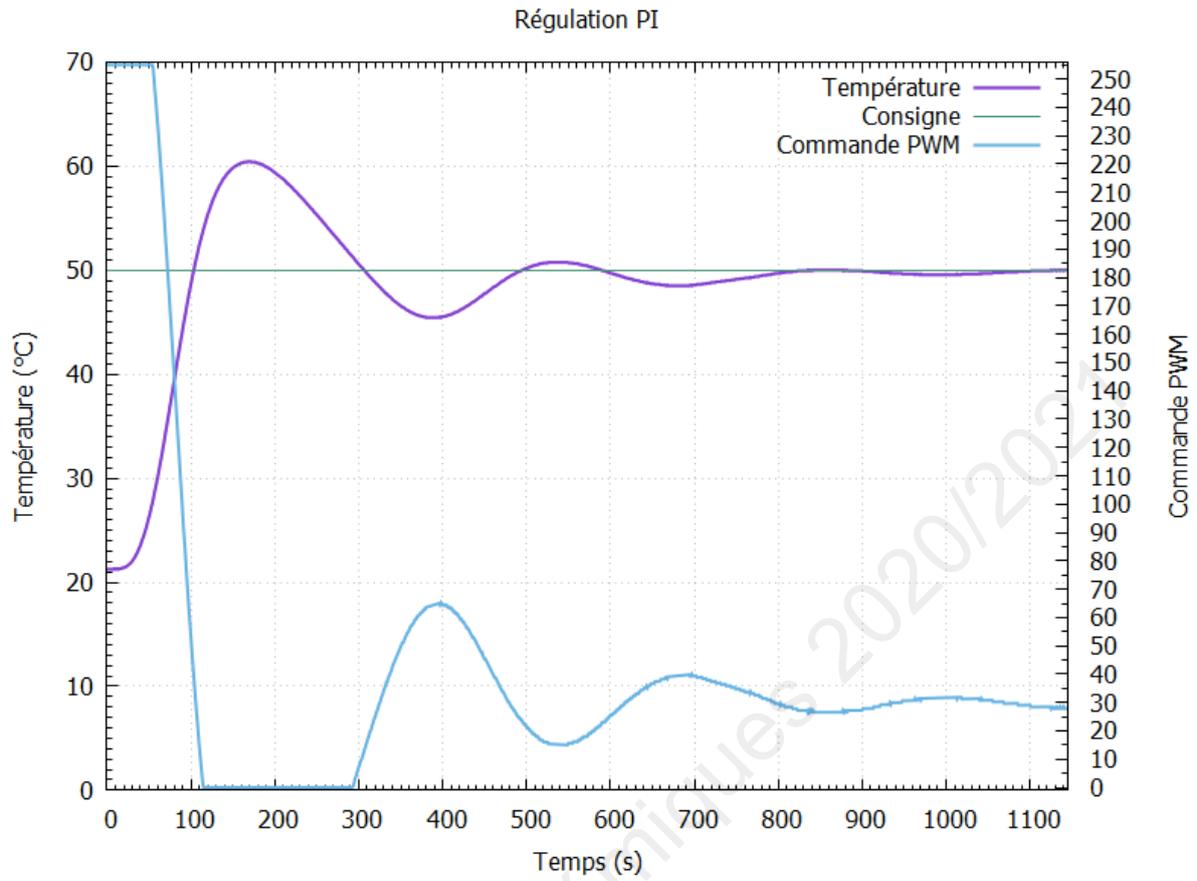
```
//Au début du programme il faut initialiser les variables
Somme_Erreurs = 0
Consigne = 28
Gain = 10
Ki = 0.019 (par exemple)
//dans la boucle principale du programme qui se répète toutes les secondes
Erreur = Consigne - Temperature
Somme_Erreurs=Somme_Erreurs+Erreur
Commande = Gain * Erreur + Ki * Somme_Erreurs
si (Commande>255) alors Commande = 255
si (Commande<0) alors Commande = 0
Signal_PWM=Commande
```



Réalisez ce code dans un programme. Testez le montage et observez l'évolution de la température et de la commande.

Là encore, toute la difficulté réside dans le choix du coefficient Ki.





Analyse du résultat

On observe que :

- L'erreur statique a disparu. Nous atteignons avec précision la température désirée.
- Les amplitudes d'oscillations ont légèrement augmenté.

Régulation avec correcteur Proportionnel Intégral Dérivé

Afin de lutter contre les oscillations encore présentes lors de la régulation PI, nous allons ajouter un terme D comme Dérivée à notre formule de commande.

Ce terme va agir comme un véritable “amortisseur” en “absorbant” les mouvements trop brusque de notre courbe de température. Le principe repose sur l'analyse de la vitesse d'évolution de la température et l'introduction d'un terme proportionnel à cette évolution afin de contrer celle-ci.

Pour cela :

On calcule la variation de l'erreur entre deux mesures :

$\Delta_{\text{Erreur}} = \text{Erreur} - \text{Erreur_precedente}$.

Ce paramètre nous renseigne sur la vitesse d'évolution de la température.

On ajoute ce terme à notre formule de commande en le multipliant par un coefficient Kd. on a alors :

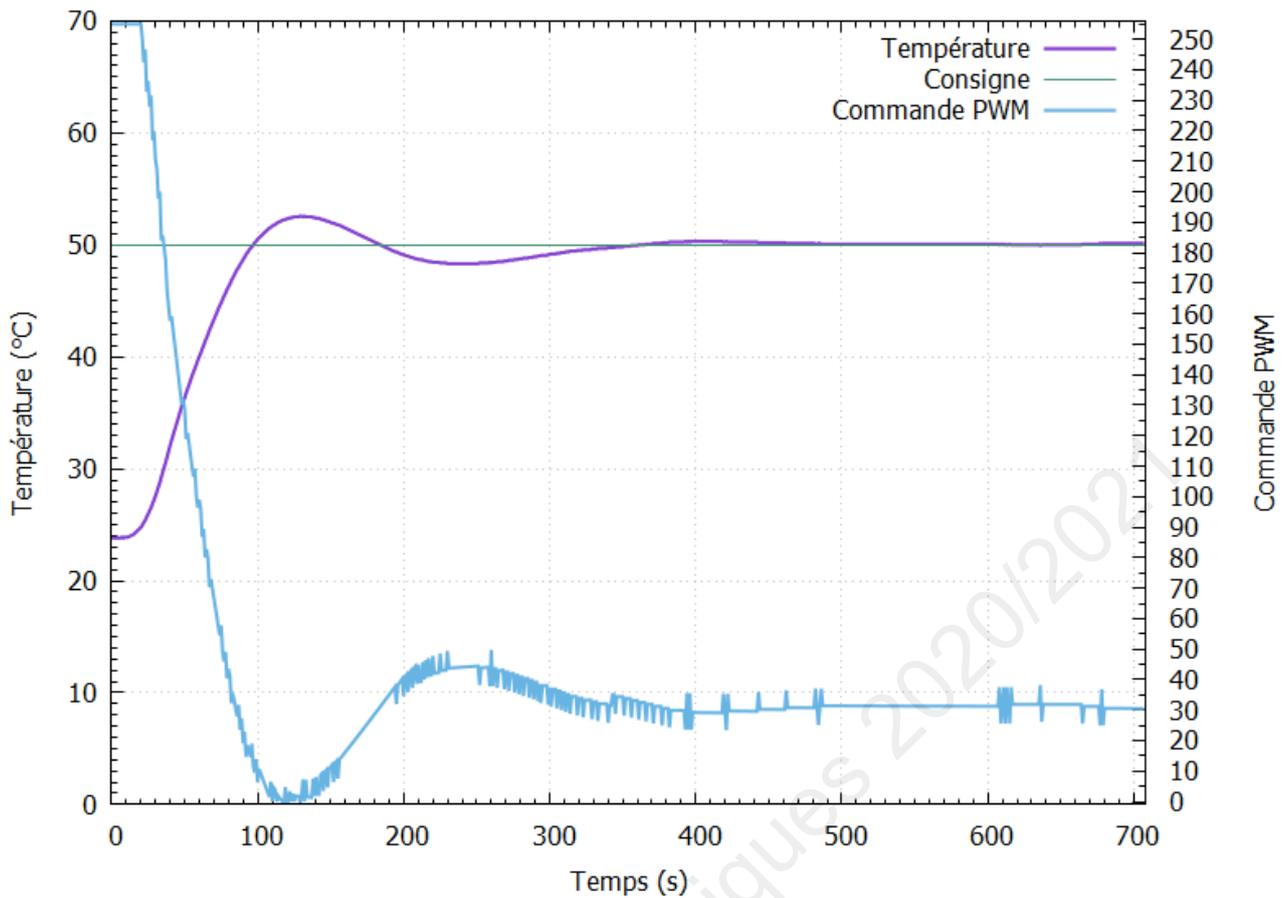
$\text{Commande} = \text{Gain} \times \text{Erreur} + K_i \times \text{Somme_Erreurs} + K_d \times \Delta_{\text{Erreur}}$

Lorsque la température se stabilise, la variation d'erreur Δ_{Erreur} tends vers 0 et le terme $K_d \times \Delta_{\text{Erreur}}$ devient nul dans notre formule de commande.

Voici le pseudo-code correspondant :

```
//Au début du programme il faut initialiser les variables
Somme_Erreurs = 0
Consigne = 50
Gain = 10.2
Ki = 0.002
Erreur_precedente = 0
Kd = 90
//dans la boucle principale du programme qui se répète toutes les secondes
Erreur = Consigne - Temperature
Somme_Erreurs=Somme_Erreurs+Erreur
Delta_Erreur= Erreur - Erreur_precedente
Erreur_precedente = Erreur
Commande = Gain * Erreur + Ki * Somme_Erreurs + Kd * Delta_Erreur
si (Commande>255) alors Commande = 255
si (Commande<0) alors Commande = 0
Signal_PWM=Commande
```

Régulation PID



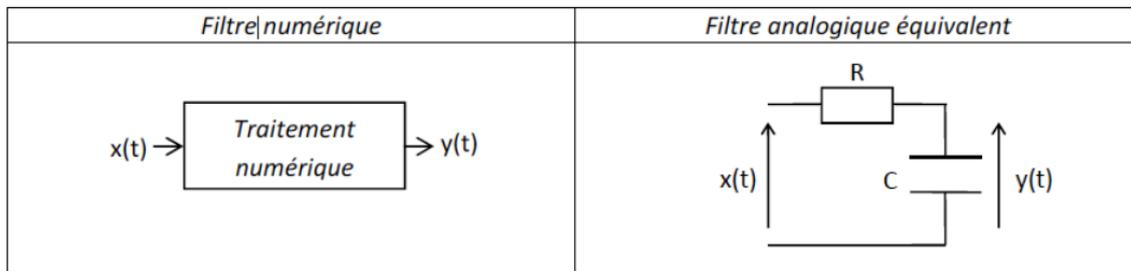
Régulation PID sur la tête d'imprimante

Analyse du résultat

On observe que :

- Comme prévu, la température se stabilise bien autour de la valeur de la consigne.
- Les oscillations sont bien amorties. Le premier pic de température culmine à 52.2 °C. Le terme Dérivé de notre commande "absorbe" bien les effets des inerties thermiques.
- La courbe bleu de commande PWM est maintenant hérissée de pics qui illustrent l'action du terme Dérivé sous forme d'impulsions courtes (1s typiquement) mais assez puissantes pour contrer les variations brutales de la température.

Réalisation d'un filtrage numérique



- Equation du filtre analogique :

$$\tau \times \frac{dy}{dt} + y(t) = x(t)$$

- Equation (appelée équation de récurrence) du filtre numérique équivalent :

$$y_n = \frac{\alpha}{1 + \alpha} \times y_{n-1} + \frac{1}{1 + \alpha} \times x_n$$

avec $\alpha = \frac{\tau}{T_E}$ et $\tau = RC$

L'idée est au départ de remplacer le circuit RC par un filtre numérique.

Sachant que nous effectuons une acquisition toutes les $T_E=10$ ms. La fréquence d'acquisition est de $f_e=100$ Hz.

avec une fréquence équivalente de coupure $f_c=2$ Hz, l'équation devient (voir feuille excel) :

$$y_n = 0,88836479 \times y_{n-1} + 0,11163521 \times x_n$$

Ce qui se traduit dans le programme par :

```
entree=analogRead(A1);
mesure= 0.88836479*mesure+0.11163521*entree;
```

Dans le programme, le calcul se fait toutes les 10 ms , l'affichage de la valeur toutes les 100 ms sur l'écran LCD et toutes les secondes sur le moniteur.

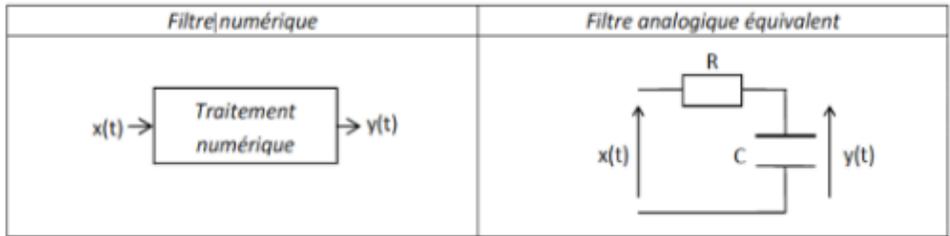
Observations :

on constate bien que tel quel, le filtrage ne donne rien. Les conditions de Shannon ne sont pas respectées. Il est indispensable de placer un filtre anti-repliement afin de couper les fréquences qui ne respecteraient pas ces conditions. En théorie ici, toutes les fréquences supérieures à 50 Hz.

En pratique, nous avons pris $f_c=20$ Hz.

Fréquence d'échantillonnage fs(Hz) =	100	Fréquence de coupure du filtre fc(Hz) =	2	alpha/(1+alpha)	0,8883648
coefficients du filtre numérique :					
constante Tau	0,0795775	alpha	7,9577472	1/(1+alpha)	0,1116352
Tau	0,3978874		7,9577472		

Temps	Xn	Yn	s	uc(t)
0	5	0	0	0
0,01	5	0,5581761	0,295587	0,5904431
0,02	5	1,05404	0,8518123	1,1111616
0,03	5	1,4945481	1,3422724	1,5703892
0,04	5	1,88588	1,7747431	1,9753872
0,05	5	2,2335254	2,1560807	2,3325595
0,06	5	2,5423614	2,4923309	2,6475539
0,07	5	2,8167204	2,7888246	2,925351
0,08	5	3,0604513	3,0502625	3,1703435
0,09	5	3,2769732	3,2807893	3,3864051
0,1	5	3,4693237	3,4840598	3,5769523
0,11	5	3,640201	3,6632967	3,744998

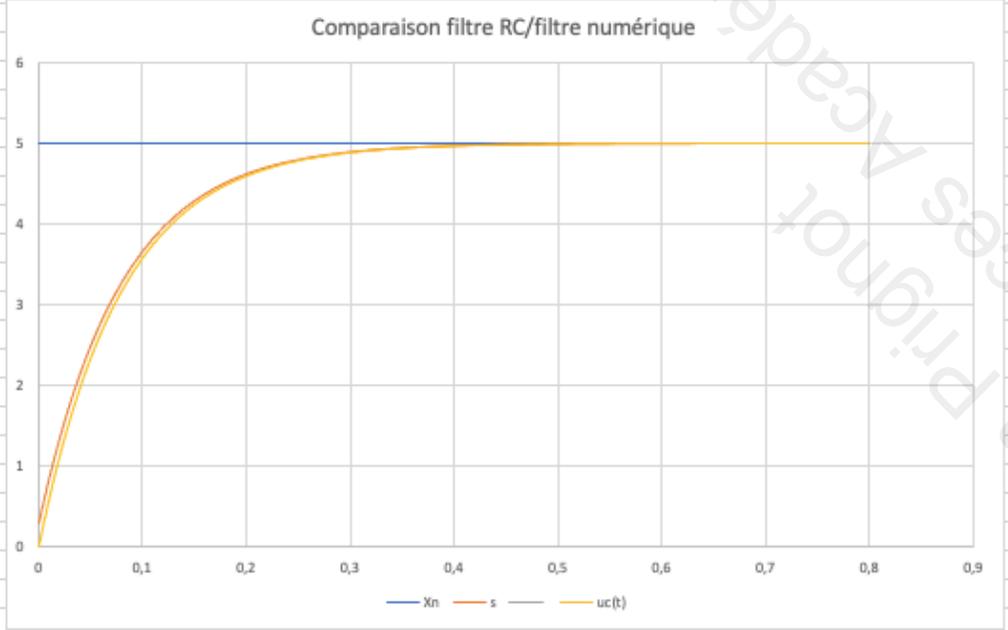


- Equation du filtre analogique :

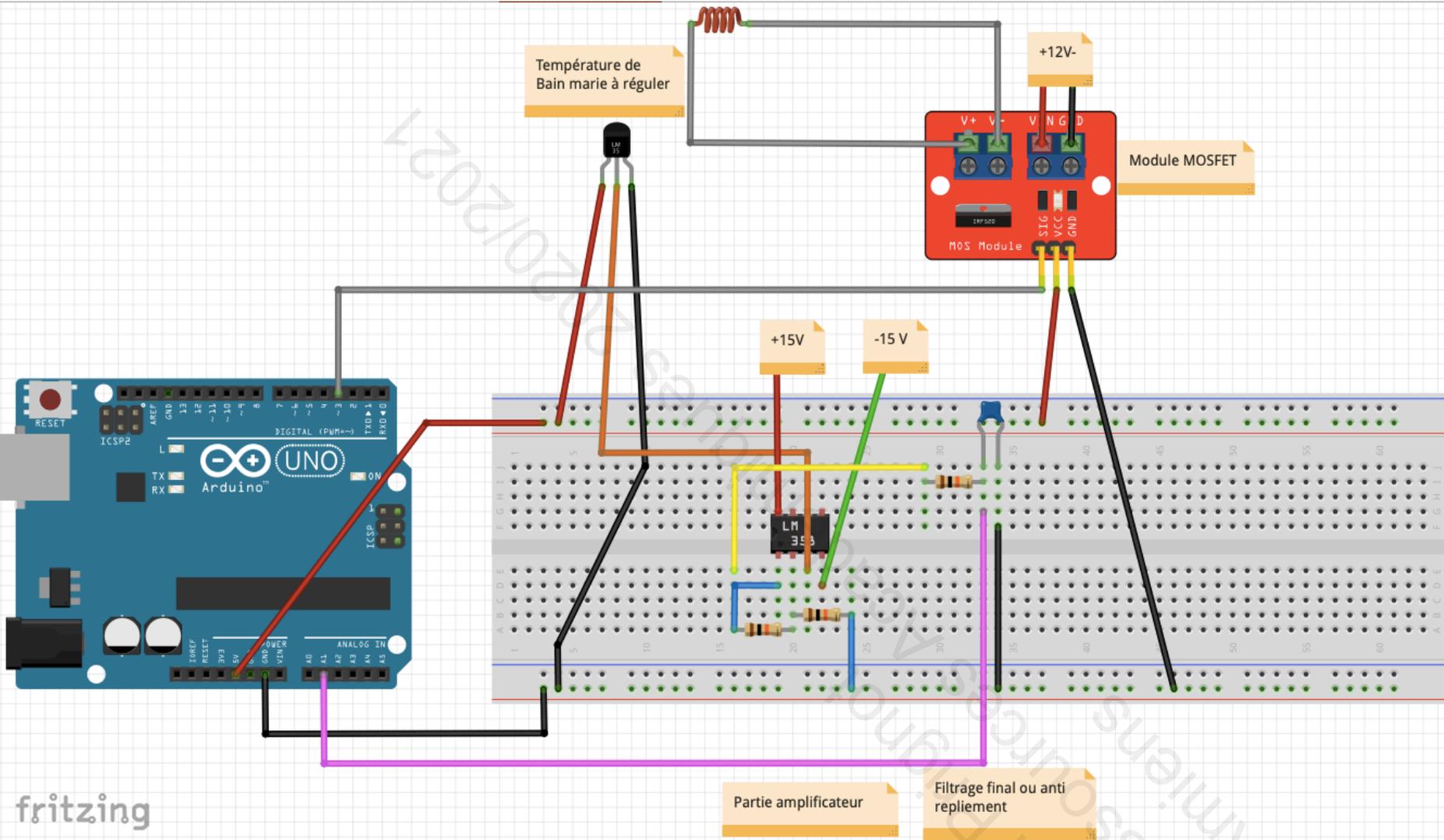
$$\tau \times \frac{dy}{dt} + y(t) = x(t)$$
- Equation (appelée équation de récurrence) du filtre numérique équivalent :

$$y_n = \frac{\alpha}{1 + \alpha} \times y_{n-1} + \frac{1}{1 + \alpha} \times x_n$$

avec $\alpha = \frac{\tau}{T_E}$ et $\tau = RC$



Simon Prignot Ressources académiques 2017-2021 Amiens



Programmes

Programme 1 : Mesure de température toutes les 1s avec Thermistance 4,7 kohms

```

// Mesure de la resistance d'un CTN
// Calcul de la température à partir de la relation de Steinhart-Hart

#define Vcc 5 // Tension d'alimentation
#define Ro 4700 // Résistance du pont
#define A 1.345609486e-3
#define B 2.291677945e-4
#define C 1.427209262e-7

float u; // Tension CTN
float R; // Résistance CTN
float logR; // ln(R)
float T; // Température en °C

void setup() {
  Serial.begin(9600); // Paramétrage du port série
  Serial.print("R = "); // Début affichage
  Serial.print("; ");
  Serial.println("T = ");
}

void loop() {
  u = analogRead(A0) * 5.0 / 1024; // Lecture tension en V
  R = Ro * u / (Vcc - u); // Calcul de la résistance
  logR = log(R); // Calcul de ln(R)
  T = (1.0 / (A + B * logR + C * logR * logR * logR)); // Calcul de la température
  T = T - 273.15; // Conversion en °C
  Serial.print(R);
  Serial.print("; ");
  Serial.println(T); // Fin affichage
  delay(1000); // Temporisation de 1s
}

```

Programme 2 : Mesure de la température toutes les secondes avec LM35

```
#define Vcc 5.0      // Tension d'alimentation

float u;           // Tension aux bornes du capteur
float T;           // Température en °C

void setup() {
  Serial.begin(9600); // Paramétrage du port série
}

void loop() {
  u = analogRead(A0) * Vcc / 1024; // Lecture tension en V
  T = u * 100;                     // Calcul de la température en °C
  // Début affichage

  Serial.print("T = ");
  Serial.println(T);               // Fin affichage
  delay(1000);                     // Temporisation de 1s
}
```

Simon Prignot
Ressources Académiques 2020/2021
Amiens

Programme 3 : Mesures avec LM 35 et tension de référence interne

```

#define Vcc 1.1      // Tension d'alimentation

float u;           // Tension aux bornes du capteur
float T;          // Température en °C

void setup() {
  Serial.begin(9600); // Paramétrage du port série
  analogReference(INTERNAL);
}

void loop() {
  u = analogRead(A0) * Vcc / 1024; // Lecture tension en V
  T = u * 100; // Calcul de la température en °C
  // Début affichage

  Serial.print("T = ");
  Serial.println(T); // Fin affichage
  delay(1000); // Temporisation de 1s
}

```

Programme 4 : Mesures répétées pour incertitude de type A (entrée A1)

```

float temperature,tension;
int mesure;

// Boucle Setup pour indiquer le port de communication
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  analogReference(INTERNAL);

  pinMode(A0,INPUT);

  Serial.println("Température (°C)");

  delay (1000);
  for (i=0;i<10;i++){

    mesure=analogRead(A1);
    tension=(mesure*1.1)/1024;
    temperature=tension*100;

    Serial.println(temperature);

    delay(10); // la mesure se fait environ toutes les 10 ms.

  }
}

void loop()
{
}

```

Programmes 5 : Montage comparateur simple avec moyenne sur 20 mesures

```

//Fonction millis() utilisée pour mesurer le temps
unsigned long millis();

//variables pour gestion du temps

float temps = 0;
unsigned long ecart;
unsigned long tempsms;
unsigned long lastTime;

// variable pour la commande
boolean commande;

float consigne;

float temperature, tension;
int mesure;
unsigned long int avgValue;
int buf[20], temp;

// Boucle Setup pour indiquer le port de communication
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  commande = 1; // on initialise la commande à 0. On ne chauffe pas avant d'avoir la température
  consigne = 28, 00; // température de consigne

  analogReference(INTERNAL); // notre tension de référence interne sera de 1.1V
  pinMode(4, OUTPUT); //On utilisera D4 pour commander le relais
  pinMode(A0, INPUT); //L'entrée analogique A0 mesurera la tension issue du capteur de température
  digitalWrite(4, commande);
  Serial.print("Temps(s) "); Serial.print(";"); Serial.println("Température (°C)");

  lastTime = millis(); //On initialise le chrono
}

void loop()
{
  // Gestion du temps

  ecart = millis() - lastTime; //mesure du temps depuis la dernière mesure en millisecondes
  if (ecart > 1000) { //Si une seconde est passée depuis la dernière mesure
    lastTime = millis(); //on réinitialise le chrono à 0
    tempsms = (tempsms + ecart); //valeur du chronomètre en ms

    // gestion des mesures
    for (int i = 0; i < 20; i++) // On effectue 20 mesures toutes les 10 ms qu'on stocke dans un tableau
    {
      buf[i] = analogRead(A0);
      delay(10);
    }
    for (int i = 0; i < 19; i++) //Range les valeurs de la plus petite à la plus grande dans le tableau
    {
      for (int j = i + 1; j < 19; j++)
      {
        if (buf[i] > buf[j])
        {
          temp = buf[i];
          buf[i] = buf[j];
          buf[j] = temp;
        }
      }
    }

    avgValue = 0;
    for (int i = 6; i < 14; i++) // On fait la moyenne des 8 mesures médianes
    avgValue += buf[i];
    tension = (float)avgValue * 1.1 / 1024 / 8; // Calcul de la tension moyenne associée à ces mesures

    temperature = tension * 100; // On multiplie par 100 car on a 10 mV/°C au départ.

    temps = tempsms / 1000; // Calcul du temps écoulé en seconde

    Serial.print(temps); Serial.print(";"); Serial.println(temperature); //on affiche le temps et la température séparées par un point virgule pour exporter facilement
    // sous regressi

    // gestion de la commande comparateur

    if (consigne > temperature) {
      commande = 0;
    }
    else {
      commande = 1;
    }
    digitalWrite(4, commande);
  }
}

```

Programme 6 : Régulation proportionnelle

```

// bibliothèques liquidCrystal à télécharger

#include <Wire.h>;
#include <LiquidCrystal_I2C.h>;
unsigned long millis();

unsigned long ecart;
unsigned long tempsms;
unsigned long lastTime;
float temps=0;
float commande;
float consigne;

float temperature,tension;
int mesure;
int N=255;
int Gain=50;
unsigned long int avgValue; //Store the average value of the sensor feedback

int buf[20],temp;

//déclaration optionnelle de l'afficheur 2 lignes)
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

// Boucle Setup pour indiquer le port de communication
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  commande=255;
  consigne=28,
  lcd.init(); // initialisation de l'afficheur
  analogReference(INTERNAL);

  pinMode(3,OUTPUT);

  delay(1000);
  //digitalWrite(3,commande);
  Serial.print("Temps(s) ");Serial.print(";");Serial.print("Température (°C)"); Serial.println("N (pwm)");

  //affichage optionnel sur afficheur
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Consigne :");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Temp :");

// Boucle principale
lastTime=millis();
}
void loop()
{

ecart=millis()-lastTime;
  if(ecart>1000){

    tempsms=(tempsms+ecart);

    for(int i=0;i<20;i++) //Acquisition de 20 valeurs
    {
      buf[i]=analogRead(A0);
      delay(10);
    }

    for(int i=0;i<19;i++) //tri du plus petit au plus grand
    {
      for(int j=i+1;j<19;j++)
      {
        if(buf[i]>buf[j])
        {
          temp=buf[i];
          buf[i]=buf[j];
          buf[j]=temp;
        }
      }
    }
    avgValue=0;
    for(int i=6;i<14;i++) { //Moyenne des mesures

      avgValue+=buf[i];}

    tension=(float)avgValue*1.1/1024/8; //calcul de la tension
  }
}

```

```
temperature=tension*100.0/2.0; // Calcul de la température avec amplificateur par 2

temps=tempsms/1000;

Serial.print(temps);Serial.print(";");Serial.print(temperature);Serial.print(" ");Serial.println(N);
lastTime=millis();

// Affichage optionnel sur afficheur LCD

lcd.setCursor(12, 0);
lcd.print(consigne);
lcd.setCursor(12,1);
lcd.print(temperature);

//commande avec réglage proportionnel

N=Gain*(consigne-temperature);
if (N>255) {N=255;}
analogWrite(3,N);
if (N<1) {N=0;}
analogWrite(3,N);
}
}
```

Simon Prignot
Ressources Académiques 2020/2021
Amiens

Programme 7 : Régulation proportionnelle sans gestion du temps et avec filtre RC

```
// bibliothèques liquidCrystal à télécharger

#include <Wire.h>;
#include <LiquidCrystal_I2C.h>;

float commande;
float consigne;

float temperature,tension;
int mesure;
int N=255;
int Gain=50;

int temp;

//déclaration optionnelle de l'afficheur 2 lignes)
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  commande=255;
  consigne=28,

  lcd.init(); // initialisation de l'afficheur
  analogReference(INTERNAL);

  pinMode(3,OUTPUT);

  delay(1000);
  //digitalWrite(3,commande);
  Serial.print("Temps(s) ");Serial.print(";");Serial.print("Température (°C)"); Serial.println("N (pwm)");

  //affichage optionnel sur afficheur
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Consigne :");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Temp :");

  // Boucle principale
}

void loop()
{
  mesure=analogRead(A0);

  tension=(float)mesure*1.1/1024 ; //calcul de la tension

  temperature=tension*100.0/2.0; // Calcul de la température avec amplificateur par 2

  Serial.print(temps);Serial.print(";");Serial.print(temperature);Serial.print("; ");Serial.println(N);

  // Affichage optionnel sur afficheur LCD

  lcd.setCursor(12, 0);
  lcd.print(consigne);
  lcd.setCursor(12,1);
  lcd.print(temperature);

  //commande avec réglage proportionnel

  N=Gain*(consigne-temperature);
  if (N>255) {N=255;}
  analogWrite(3,N);
  if (N<1) {N=0;}
  analogWrite(3,N);
  delay(1000);
}
```

Programme 8 : Régulation proportionnelle avec gestion du temps et avec filtre numérique

```

#include <Wire.h>;
#include <LiquidCrystal_I2C.h>;

int k=0;
unsigned long millis();
unsigned long ecart;
unsigned long tempsms=0;
unsigned long lastTime;

float temps=0;
double commande;
double consigne;

double temperature,tension;
int entree,entreeprec;
int N=255;
int Gain=50;
float mesure=0.00;

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  commande=255;
  consigne=28,
  lcd.init(); // initialisation de l'afficheur
  analogReference(INTERNAL);

  pinMode(3,OUTPUT);

  Serial.print("Temps(s) ");Serial.print(";");Serial.print("Température (°C)"); Serial.println("N (pwm)");
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Consigne :");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Temp :");

  lastTime=millis();
}

// Boucle principale
void loop()
{
  ecart=millis()-lastTime;
  if(ecart>10){
    k=k+1;
    entree=analogRead(A0);
    mesure= 0.993756*mesure+0.00624395*entree;
    tempsms=(tempsms+ecart);
    temps=tempsms/1000;
    lastTime=millis();
    tension=1.1*mesure/1024.0;
    temperature=tension*100/2;
    entreeprec=entree;
    N=Gain*(consigne-temperature);
    if (N>255) {N=255;}
    analogWrite(3,N);
    if (N<1) {N=0;}
    if (k==100){
      Serial.print(temps);Serial.print(";");Serial.print(temperature);Serial.print("; ");Serial.println(N);
      lcd.setCursor(12, 0);
      lcd.print(consigne);
      lcd.setCursor(12,1);
      lcd.print(temperature);
      k=0;
    }
  }
}

```

Programme 9 : Régulation PID avec gestion du temps et avec filtre numérique

```

#include <Wire.h>;
#include <LiquidCrystal_I2C.h>;

unsigned long millis();
int k=0;
int s=0;
unsigned long ecart;
unsigned long lastTime;
float temps=0;

float ki=0.01;
float kd=90;
double commande;
double consigne;
int N=255;
int Gain=70;

double temperature,tension,erreur,Somme_erreurs,Delta_erreur ;
double erreur_precedente=0;
int entree,entreeprec;

float mesure=0.00;
int temp;
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

// Boucle Setup pour indiquer le port de communication
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  commande=255;
  consigne=30,
  lcd.init(); // initialisation de l'afficheur
  analogReference(INTERNAL);
  pinMode(3,OUTPUT);

  Serial.print("Temps(s) ");Serial.print(";");Serial.print("Température (°C)"); Serial.println("N (pwm)");
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Consigne :");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Temp :");

  lastTime=millis();
}

// Boucle principale
void loop()
{
  ecart=millis()-lastTime;
  if(ecart>10){
    lastTime=millis();
    k=k+1;
    entree=analogRead(A1);
    mesure= 0.88836479*mesure+0.11163521*entree;

    tension=1.1*mesure/1024.0;
    temperature=tension*100/2;

    if (k==10){
      lcd.setCursor(11, 0);
      lcd.print(consigne,2);
      lcd.setCursor(11,1);
      lcd.print(temperature,2);
      s=s+1;
      k=0;}

    if (s==10) {
      temps=temps+1;
      Serial.print(temps);Serial.print(";");Serial.print(temperature);Serial.print("; ");Serial.println(N);
      s=0;
      erreur=consigne-temperature;
      Somme_erreurs=Somme_erreurs+erreur;
      Delta_erreur=erreur-erreur_precedente;
      erreur_precedente=erreur;

      N=Gain*(erreur)+ki*Somme_erreurs+kd*Delta_erreur;
      if (N>255) {N=255;}

      if (N<1) {N=0;}
      analogWrite(3,N);
    }
  }
}

```


NTC Thermistors, Radial Leaded, Standard Precision



FEATURES

- Accuracy over a wide temperature range
- High stability over a long life
- Excellent price/performance ratio
- UL recognized, file E148885
- Material categorization:
For definitions of compliance please see www.vishay.com/doc?99912


RoHS
COMPLIANT

APPLICATIONS

- Temperature measurement, sensing and control, temperature compensation in industrial and consumer electronics

DESCRIPTION

These thermistors have a negative temperature coefficient. The device consists of a chip with two solid copper tin plated leads. It is grey lacquered and color coded, but not insulated.

PACKAGING

The thermistors are packed in bulk or tape on reel; see code numbers and relevant packaging quantities.

DESIGN-IN SUPPORT

For complete Curve Computation, visit: www.vishay.com/resistors-non-linear/curve-computation-list/

MARKING

The thermistors are marked with colored bands; see dimensions drawing and “Electrical data and ordering information”.

MOUNTING

By soldering in any position.
Not intended for potted applications.

QUICK REFERENCE DATA		
PARAMETER	VALUE	UNIT
Resistance value at 25 °C	3.3 to 470K	Ω
Tolerance on R_{25} -value	± 2; ± 3; ± 5	%
$B_{25/85}$ -value	2880 to 4570	K
Tolerance on $B_{25/85}$ -value	± 0.5 to ± 3	%
Operating temperature range: At zero power dissipation; continuously	- 40 to + 125	°C
At zero power dissipation; for short periods	≤ 150	
Response time (in oil)	≈ 1.2	s
Thermal time constant τ (for information only)	15	s
Dissipation factor δ (for information only)	7 8.5 (for R_{25} -value ≤ 680 Ω)	mW/K
Maximum power dissipation at 55 °C	500	mW
Climatic category (LCT/UCT/days)	40/125/56	-
Weight	≈ 0.3	g

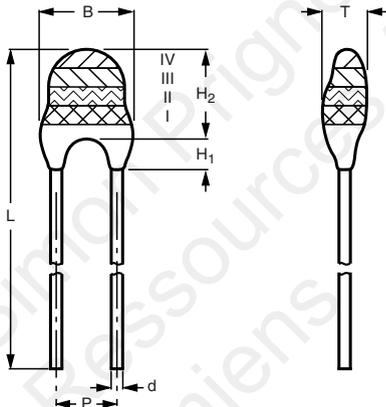
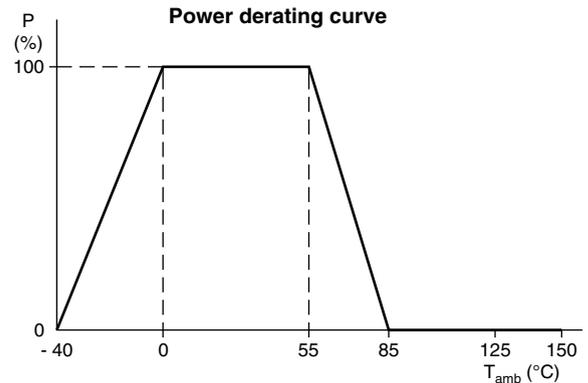
ELECTRICAL DATA AND ORDERING INFORMATION									
R_{25} (Ω)	$B_{25/85}$ -VALUE (K)		UL APPROVED (Y/N)	SAP MATERIAL NUMBER NTCLE100E3...B0/T1/T2 ⁽²⁾	OLD 12NC CODE 2381 640 3/4/6.... ⁽¹⁾	COLOR CODE ⁽³⁾			
		(± %)				I	II	III	
3.3	2880	3	N	338*B0	*338	Orange	Orange	Gold	
4.7	2880	3	N	478*B0	*478	Yellow	Violet	Gold	
6.8	2880	3	N	688*B0	*688	Blue	Grey	Gold	
10	2990	3	N	109*B0	*109	Brown	Black	Black	
15	3041	3	N	159*B0	*159	Brown	Green	Black	
22	3136	3	N	229*B0	*229	Red	Red	Black	
33	3390	3	Y	339*B0	*339	Orange	Orange	Black	
47	3390	3	Y	479*B0	*479	Yellow	Violet	Black	
68	3390	3	Y	689*B0	*689	Blue	Grey	Black	
100	3560	1.5	Y	101*B0	*101	Brown	Black	Brown	
150	3560	1.5	Y	151*B0	*151	Brown	Green	Brown	
220	3560	1.5	Y	221*B0	*221	Red	Red	Brown	
330	3560	1.5	Y	331*B0	*331	Orange	Orange	Brown	

ELECTRICAL DATA AND ORDERING INFORMATION

R_{25} (Ω)	$B_{25/85}$ -VALUE		UL APPROVED (Y/N)	SAP MATERIAL NUMBER NTCLE100E3...B0/T1/T2 ⁽²⁾	OLD 12NC CODE 2381 640 3/4/6... ⁽¹⁾	COLOR CODE ⁽³⁾		
	(K)	(\pm %)				I	II	III
470	3560	1.5	Y	471*B0	*471	Yellow	Violet	Brown
680	3560	1.5	Y	681*B0	*681	Blue	Grey	Brown
1000	3528	0.5	Y	102*B0	*102	Brown	Black	Red
1500	3528	0.5	Y	152*B0	*152	Brown	Green	Red
2000	3528	0.5	Y	202*B0	*202	Red	Black	Red
2200	3977	0.75	Y	222*B0	*222	Red	Red	Red
2700	3977	0.75	Y	272*B0	*272	Red	violet	Red
3300	3977	0.75	Y	332*B0	*332	Orange	Orange	Red
4700	3977	0.75	Y	472*B0	*472	Yellow	Violet	Red
5000	3977	0.75	Y	502*B0	*502	Green	Black	Red
6800	3977	0.75	Y	682*B0	*682	Blue	Grey	Red
10 000	3977	0.75	Y	103*B0	*103	Brown	Black	Orange
12 000	3740	2	Y	123*B0	*123	Brown	Red	Orange
15 000	3740	2	Y	153*B0	*153	Brown	Green	Orange
22 000	3740	2	Y	223*B0	*223	Red	Red	Orange
33 000	4090	1.5	Y	333*B0	*333	Orange	Orange	Orange
47 000	4090	1.5	Y	473*B0	*473	Yellow	Violet	Orange
50 000	4190	1.5	Y	503*B0	*503	Green	Black	Orange
68 000	4190	1.5	Y	683*B0	*683	Blue	Grey	Orange
100 000	4190	1.5	Y	104*B0	*104	Brown	Black	Yellow
150 000	4370	2.5	Y	154*B0	*154	Brown	Green	Yellow
220 000	4370	2.5	Y	224*B0	*224	Red	Red	Yellow
330 000	4570	1.5	N	334*B0	*334	Orange	Orange	Yellow
470 000	4570	1.5	N	474*B0	*474	Yellow	Violet	Yellow

Notes

- (1) Replace * in 12NC by 3 for 5 %, 6 for 3 %, 4 for 2 %
 (2) Replace * in SAP by J for 5 %, H for 3 %, G for 2 %
 (3) For $R_{25} \pm 2$ % band IV is red, ± 3 % band IV is orange, ± 5 % band IV is gold

DIMENSIONS in millimeters

DERATING AND TEMPERATURE TOLERANCES

Note

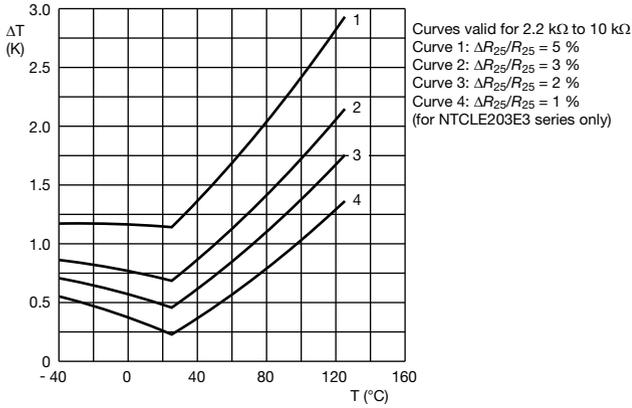
- Zero power is considered as measuring power max. 1 % of max. power.

PHYSICAL DIMENSIONS FOR RELEVANT TYPE (all dimensions in millimeters)

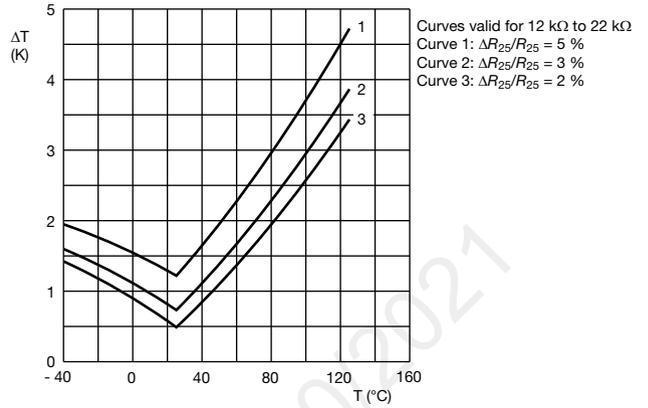
R_{25} -VALUE	$B_{MAX.}$	d	H_1		H_2 MAX.	L	P	$T_{MAX.}$
			MIN.	MAX.				
3.3 Ω to 220 Ω	5.0	0.6 \pm 0.06	1.0	4.0	6.0	24 \pm 1.5	2.54	4.0
330 Ω to 470 k Ω	3.3 \pm 0.5	0.6 \pm 0.06	1.0	3.0	6.0	24 \pm 1.5	2.54	3.0



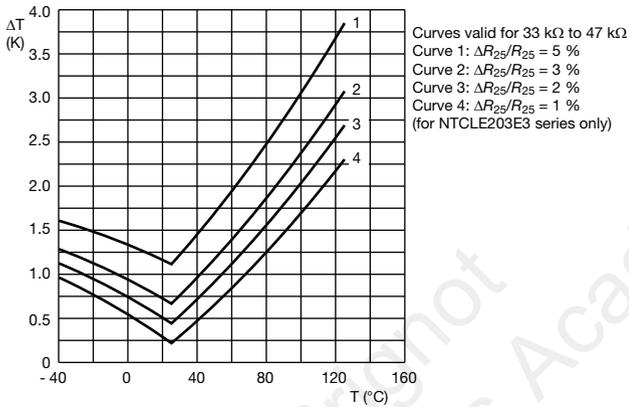
TEMPERATURE DEVIATION AS A FUNCTION OF THE AMBIENT TEMPERATURE



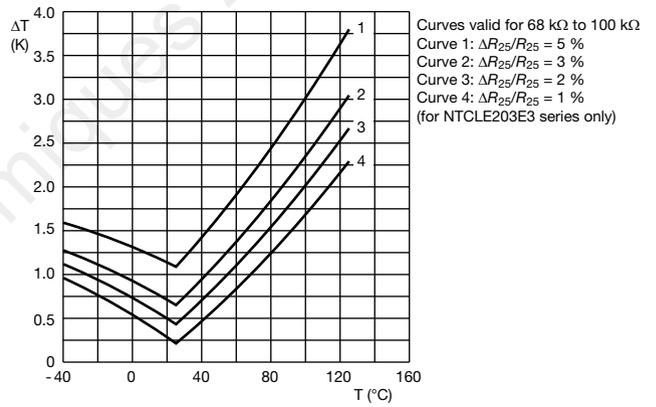
TEMPERATURE DEVIATION AS A FUNCTION OF THE AMBIENT TEMPERATURE



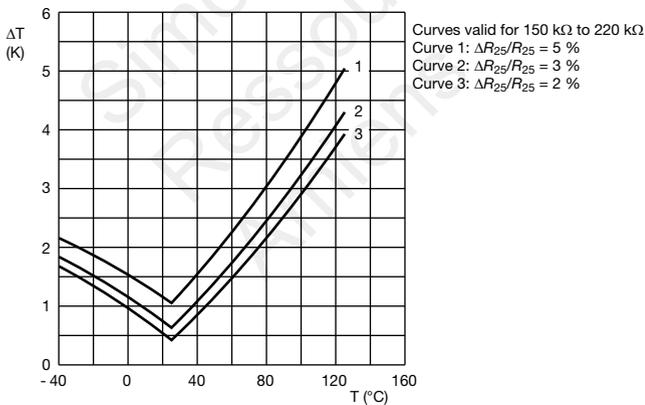
TEMPERATURE DEVIATION AS A FUNCTION OF THE AMBIENT TEMPERATURE



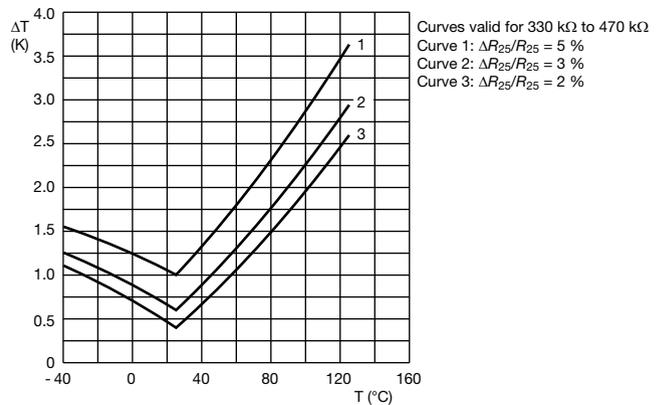
TEMPERATURE DEVIATION AS A FUNCTION OF THE AMBIENT TEMPERATURE



TEMPERATURE DEVIATION AS A FUNCTION OF THE AMBIENT TEMPERATURE



TEMPERATURE DEVIATION AS A FUNCTION OF THE AMBIENT TEMPERATURE



R_T VALUE AND TOLERANCE

These thermistors have a narrow tolerance on the B-value, the result of which provides a very small tolerance on the nominal resistance value over a wide temperature range. For this reason the usual graphs of $R = f(T)$ are replaced by Resistance Values at Intermediate Temperatures Tables, together with a formula to calculate the characteristics with a high precision.

FORMULAE TO DETERMINE NOMINAL RESISTANCE VALUES

The resistance values at intermediate temperatures, or the operating temperature values, can be calculated using the following interpolation laws (extended "Steinhart and Hart"):

$$R_{(T)} = R_{ref} \times e^{(A+B/T+C/T^2+D/T^3)} \quad (1)$$

$$T_{(R)} = \left(A_1 + B_1 \ln \frac{R}{R_{ref}} + C_1 \ln^2 \frac{R}{R_{ref}} + D_1 \ln^3 \frac{R}{R_{ref}} \right)^{-1} \quad (2)$$

where:

A, B, C, D, A₁, B₁, C₁ and D₁ are constant values depending on the material concerned; see table below.

R_{ref.} is the resistance value at a reference temperature (in this event 25 °C, R_{ref.} = R₂₅).

T is the temperature in K.

Formulae numbered and are interchangeable with an error of max. 0.005 °C in the range 25 °C to 125 °C and max. 0.015 °C in the range - 40 °C to + 25 °C.

DETERMINATION OF THE RESISTANCE/TEMPERATURE DEVIATION FROM NOMINAL VALUE

The total resistance deviation is obtained by combining the "R₂₅-tolerance" and the "resistance deviation due to B-tolerance".

When:

X = R₂₅-tolerance

Y = resistance deviation due to B-tolerance

Z = complete resistance deviation,

then: $Z = \left[\left(1 + \frac{X}{100} \right) \times \left(1 + \frac{Y}{100} \right) - 1 \right] \times 100 \%$ or $Z \approx X + Y$

When:

TCR = temperature coefficient

ΔT = temperature deviation,

then: $\Delta T = \frac{Z}{TCR}$

The temperature tolerances are plotted in the graphs on the previous page.

Example: at 0 °C, assume X = 5 %, Y = 0.89 % and TCR = 5.08 %/K (see table), then:

$$Z = \left\{ \left[1 + \frac{5}{100} \right] \times \left[1 + \frac{0.89}{100} \right] - 1 \right\} \times 100 \%$$

$$= \{ 1.05 \times 1.0089 - 1 \} \times 100 \% = 5.9345 \% (\approx 5.93 \%)$$

$$\Delta T = \frac{Z}{TCR} = \frac{5.93}{5.08} = 1.167 \text{ °C } (\approx 1.17 \text{ °C})$$

A NTC with a R₂₅-value of 10 kΩ has a value of 32.56 kΩ between - 1.17 °C and + 1.17 °C.

PARAMETER FOR DETERMINING NOMINAL RESISTANCE VALUES

NUMBER	B _{25/85} (K)	NAME	TOL. B (%)	A	B (K)	C (K ²)	D (K ³)	A ₁	B ₁ (K ⁻¹)	C ₁ (K ⁻²)	D ₁ (K ⁻³)
1	2880	Mat O. with B _n = 2880K	3	- 9.094	2251.74	229098	- 2.744820E+07	3.354016E-03	3.495020E-04	2.095959E-06	4.260615E-07
2	2990	Mat P. with B _n = 3990K	3	- 10.2296	2887.62	132336	- 2.502510E+07	3.354016E-03	3.415560E-04	4.955455E-06	4.364236E-07
3	3041	Mat Q. with B _n = 3041K	3	- 11.1334	3658.73	- 102895	5.166520E+05	3.354016E-03	3.349290E-04	3.683843E-06	7.050455E-07
4	3136	Mat R. with B _n = 3136K	3	- 12.4493	4702.74	- 402687	3.196830E+07	3.354016E-03	3.243880E-04	2.658012E-06	- 2.701560E-07
5	3390	Mat S. with B _n = 3390K	3	- 12.6814	4391.97	- 232807	1.509643E+07	3.354016E-03	2.993410E-04	2.135133E-06	- 5.672000E-09
6	3528 ⁽¹⁾	Mat I. with B _n = 3528K	0.5	- 12.0596	3687.667	- 7617.13	- 5.914730E+06	3.354016E-03	2.909670E-04	1.632136E-06	7.192200E-08
	3528 ⁽²⁾			- 21.0704	11903.95	- 2504699	2.470338E+08	3.354016E-03	2.933908E-04	3.494314E-06	- 7.712690E-07
7	3560	Mat H. with B _n = 3560K	1.5	- 13.0723	4190.574	- 47158.4	- 1.199256E+07	3.354016E-03	2.884193E-04	4.118032E-06	1.786790E-07
8	3740	Mat B. with B _n = 3740K	2	- 13.8973	4557.725	- 98275	- 7.522357E+06	3.354016E-03	2.744032E-04	3.666944E-06	1.375492E-07
9	3977	Mat A. with B _n = 3977K	0.75	- 14.6337	4791.842	- 115334	- 3.730535E+06	3.354016E-03	2.569850E-04	2.620131E-06	6.383091E-08
10	4090	Mat C. with B _n = 4090K	1.5	- 15.5322	5229.973	- 160451	- 5.414091E+06	3.354016E-03	2.519107E-04	3.510939E-06	1.105179E-07
11	4190	Mat D. with B _n = 4190K	1.5	- 16.0349	5459.339	- 191141	- 3.328322E+06	3.354016E-03	2.460382E-04	3.405377E-06	1.034240E-07
12	4370	Mat E. with B _n = 4370K	2.5	- 16.8717	5759.15	- 194267	- 6.869149E+06	3.354016E-03	2.367720E-04	3.585140E-06	1.255349E-07
13	4570	Mat F. with B _n = 4570K	1.5	- 17.6439	6022.726	- 203157	- 7.183526E+06	3.354016E-03	2.264097E-04	3.278184E-06	1.097628E-07

Notes

⁽¹⁾ Temperature < 25 °C

⁽²⁾ Temperature ≥ 25 °C



For complete Curve Computation, visit: www.vishay.com/resistors-non-linear/curve-computation-list/

RESISTANCE VALUES AT INTERMEDIATE TEMPERATURES WITH R_{25} AT (3.3, 4.7, 6.8) Ω					
T_{OPER} (°C)	PART NUMBER NTCLE100E3338***	PART NUMBER NTCLE100E3478***	PART NUMBER NTCLE100E3688***	TCR (%/K)	$\Delta R/R$ DUE TO $B_{tol.}$ (%)
	R_T (Ω)	R_T (Ω)	R_T (Ω)		
-40	45.00	64.09	92.73	-4.97	8.08
-35	35.25	50.20	72.63	-4.80	7.30
-30	27.84	39.64	57.36	-4.64	6.55
-25	22.16	31.56	45.66	-4.48	5.84
-20	17.78	25.32	36.63	-4.33	5.15
-15	14.37	20.46	29.60	-4.19	4.49
-10	11.69	16.65	24.09	-4.05	3.85
-5	9.582	13.65	19.74	-3.92	3.24
0	7.904	11.26	16.29	-3.79	2.65
5	6.560	9.344	13.52	-3.66	2.08
10	5.479	7.803	11.29	-3.55	1.54
15	4.602	6.554	9.482	-3.43	1.01
20	3.886	5.535	8.008	-3.32	0.49
25	3.300	4.700	6.800	-3.22	0.00
30	2.816	4.011	5.803	-3.12	0.48
35	2.415	3.440	4.977	-3.02	0.94
40	2.081	2.964	4.289	-2.93	1.39
45	1.801	2.566	3.712	-2.84	1.82
50	1.566	2.230	3.227	-2.76	2.24
55	1.367	1.947	2.817	-2.68	2.65
60	1.198	1.706	2.469	-2.60	3.04
65	1.054	1.501	2.172	-2.52	3.43
70	0.9308	1.326	1.918	-2.45	3.80
75	0.8248	1.175	1.700	-2.38	4.16
80	0.7334	1.044	1.511	-2.32	4.51
85	0.6542	0.9318	1.348	-2.25	4.85
90	0.5854	0.8338	1.206	-2.19	5.19
95	0.5255	0.7484	1.083	-2.13	5.51
100	0.4730	0.6737	0.9748	-2.07	5.82
105	0.4270	0.6082	0.8799	-2.02	6.13
110	0.3865	0.5505	0.7965	-1.97	6.43
115	0.3508	0.4996	0.7228	-1.92	6.72
120	0.3192	0.4545	0.6576	-1.87	7.00
125	0.2911	0.4145	0.5998	-1.82	7.28
130	0.2661	0.3789	0.5483	-1.77	7.55
135	0.2438	0.3472	0.5023	-1.73	7.81
140	0.2238	0.3188	0.4612	-1.69	8.07
145	0.2059	0.2933	0.4244	-1.65	8.32
150	0.1899	0.2704	0.3912	-1.61	8.56



For complete Curve Computation, visit: www.vishay.com/resistors-non-linear/curve-computation-list/

RESISTANCE VALUES AT INTERMEDIATE TEMPERATURES WITH R₂₅ AT (10, 15, 22) Ω									
T _{OPER} (°C)	PART NUMBER NTCLE100E3109***			PART NUMBER NTCLE100E3159***			PART NUMBER NTCLE100E3229***		
	R _T (Ω)	TCR (%/K)	ΔR/R DUE TO B _{tol.} (%)	R _T (Ω)	TCR (%/K)	ΔR/R DUE TO B _{tol.} (%)	R _T (Ω)	TCR (%/K)	ΔR/R DUE TO B _{tol.} (%)
-40	136.7	-4.86	8.39	224.8	-5.16	8.65	374.9	-5.54	8.80
-35	107.6	-4.72	7.58	174.5	-4.98	7.79	285.8	-5.31	7.95
-30	85.32	-4.58	6.81	136.6	-4.80	6.98	220.4	-5.10	7.14
-25	68.10	-4.44	6.06	107.9	-4.64	6.21	171.7	-4.90	6.36
-20	54.72	-4.31	5.35	85.94	-4.48	5.47	135.0	-4.71	5.61
-15	44.25	-4.18	4.66	68.96	-4.33	4.76	107.2	-4.53	4.89
-10	36.02	-4.06	4.00	55.74	-4.19	4.08	85.79	-4.37	4.20
-5	29.49	-3.94	3.37	45.37	-4.05	3.43	69.21	-4.22	3.53
0	24.30	-3.82	2.75	37.17	-3.92	2.81	56.26	-4.07	2.89
5	20.13	-3.71	2.16	30.65	-3.80	2.20	46.05	-3.94	2.27
10	16.77	-3.60	1.59	25.42	-3.68	1.62	37.94	-3.81	1.67
15	14.04	-3.50	1.04	21.21	-3.57	1.06	31.45	-3.69	1.10
20	11.82	-3.39	0.51	17.79	-3.46	0.52	26.23	-3.57	0.54
25	10.00	-3.30	0.00	15.00	-3.36	0.00	22.00	-3.47	0.00
30	8.500	-3.20	0.50	12.76	-3.26	0.49	18.55	-3.36	0.52
35	7.259	-3.11	0.98	10.86	-3.17	0.98	15.72	-3.26	1.02
40	6.226	-3.03	1.44	9.291	-3.08	1.46	13.38	-3.17	1.51
45	5.363	-2.94	1.89	7.982	-2.99	1.92	11.45	-3.08	1.98
50	4.639	-2.86	2.33	6.887	-2.91	2.36	9.833	-3.00	2.44
55	4.029	-2.78	2.75	5.966	-2.83	2.79	8.482	-2.92	2.88
60	3.512	-2.71	3.16	5.189	-2.75	3.21	7.346	-2.84	3.32
65	3.073	-2.64	3.56	4.529	-2.68	3.62	6.386	-2.76	3.73
70	2.698	-2.57	3.95	3.968	-2.61	4.02	5.572	-2.69	4.14
75	2.377	-2.50	4.32	3.488	-2.54	4.41	4.879	-2.62	4.53
80	2.101	-2.43	4.69	3.077	-2.48	4.78	4.286	-2.56	4.91
85	1.864	-2.37	5.04	2.722	-2.41	5.15	3.777	-2.50	5.29
90	1.658	-2.31	5.38	2.416	-2.35	5.51	3.339	-2.44	5.65
95	1.479	-2.25	5.72	2.151	-2.30	5.85	2.960	-2.38	6.00
100	1.323	-2.20	6.05	1.920	-2.24	6.19	2.632	-2.32	6.34
105	1.187	-2.14	6.36	1.719	-2.19	6.53	2.347	-2.27	6.68
110	1.068	-2.09	6.67	1.543	-2.13	6.85	2.098	-2.22	7.00
115	0.9635	-2.04	6.98	1.389	-2.08	7.17	1.880	-2.17	7.32
120	0.8712	-1.99	7.27	1.253	-2.03	7.48	1.689	-2.12	7.62
125	0.7897	-1.94	7.56	1.133	-1.99	7.78	1.521	-2.07	7.93
130	0.7174	-1.90	7.84	1.027	-1.94	8.08	1.373	-2.03	8.22
135	0.6533	-1.85	8.11	0.9326	-1.90	8.37	1.242	-1.98	8.50
140	0.5961	-1.81	8.37	0.8490	-1.86	8.65	1.126	-1.94	8.78
145	0.5451	-1.77	8.63	0.7744	-1.82	8.93	1.023	-1.90	9.06
150	0.4995	-1.73	8.89	0.7079	-1.78	9.20	0.9309	-1.86	9.32



For complete Curve Computation, visit: www.vishay.com/resistors-non-linear/curve-computation-list/

RESISTANCE VALUES AT INTERMEDIATE TEMPERATURES WITH R ₂₅ AT (33, 47, 68) Ω					
T _{OPER} (°C)	PART NUMBER NTCLE100E3339***	PART NUMBER NTCLE100E3479***	PART NUMBER NTCLE100E3689***	TCR (%/K)	ΔR/R DUE TO B _{tol.} (%)
	R _T (Ω)	R _T (Ω)	R _T (Ω)		
-40	707.0	1007	1457	-5.94	9.30
-35	528.5	752.7	1089	-5.70	8.44
-30	399.5	569.0	823.3	-5.49	7.60
-25	305.3	434.8	629.1	-5.28	6.79
-20	235.6	335.6	485.5	-5.09	6.01
-15	183.5	261.4	378.2	-4.90	5.25
-10	144.3	205.5	297.3	-4.73	4.51
-5	114.3	162.8	235.6	-4.57	3.80
0	91.34	130.1	188.2	-4.42	3.11
5	73.51	104.7	151.5	-4.27	2.45
10	59.59	84.87	122.8	-4.13	1.80
15	48.63	69.26	100.2	-4.00	1.18
20	39.94	56.88	82.29	-3.88	0.58
25	33.00	47.00	68.00	-3.76	0.00
30	27.43	39.06	56.51	-3.64	0.56
35	22.92	32.64	47.23	-3.54	1.11
40	19.26	27.42	39.68	-3.43	1.63
45	16.26	23.16	33.50	-3.34	2.14
50	13.79	19.65	28.42	-3.24	2.63
55	11.76	16.74	24.23	-3.15	3.11
60	10.06	14.33	20.74	-3.07	3.57
65	8.652	12.32	17.83	-2.98	4.02
70	7.468	10.64	15.39	-2.90	4.45
75	6.471	9.216	13.33	-2.83	4.87
80	5.628	8.015	11.60	-2.76	5.27
85	4.912	6.996	10.12	-2.69	5.66
90	4.302	6.127	8.865	-2.62	6.04
95	3.780	5.384	7.790	-2.55	6.41
100	3.332	4.746	6.867	-2.49	6.77
105	2.946	4.196	6.071	-2.43	7.11
110	2.613	3.721	5.384	-2.37	7.45
115	2.324	3.310	4.788	-2.32	7.77
120	2.072	2.951	4.270	-2.26	8.09
125	1.853	2.639	3.818	-2.21	8.39
130	1.661	2.365	3.422	-2.16	8.69
135	1.492	2.125	3.075	-2.11	8.97
140	1.344	1.914	2.770	-2.07	9.25
145	1.213	1.728	2.500	-2.02	9.52
150	1.098	1.564	2.262	-1.98	9.79



For complete Curve Computation, visit: www.vishay.com/resistors-non-linear/curve-computation-list/

RESISTANCE VALUES AT INTERMEDIATE TEMPERATURES WITH R_{25} AT (100, 150, 220, 330, 470, 680) Ω								
T_{OPER} (°C)	PART NUMBER NTCLE100E3101***	PART NUMBER NTCLE100E3151***	PART NUMBER NTCLE100E3221***	PART NUMBER NTCLE100E3331***	PART NUMBER NTCLE100E3471***	PART NUMBER NTCLE100E3681***	TCR (%/K)	$\Delta R/R$ DUE TO $B_{tot.}$ (%)
	R_T (Ω)							
-40	2193	3289	4824	7236	10 305	14 910	-5.75	4.99
-35	1652	2478	3635	5452	7766	11 235	-5.57	4.51
-30	1256	1884	2763	4144	5902	8540	-5.40	4.05
-25	962.5	1444	2117	3176	4524	6545	-5.24	3.61
-20	743.6	1115	1636	2454	3495	5057	-5.08	3.19
-15	579.0	868.5	1274	1911	2721	3937	-4.93	2.78
-10	454.2	681.2	999.1	1499	2135	3088	-4.78	2.38
-5	358.8	538.2	789.4	1184	1686	2440	-4.64	2.01
0	285.4	428.2	628.0	942.0	1342	1941	-4.51	1.64
5	228.6	342.9	502.9	754.4	1074	1554	-4.38	1.29
10	184.2	276.4	405.3	608.0	866.0	1253	-4.25	0.95
15	149.4	224.1	328.7	493.1	702.2	1016	-4.13	0.62
20	121.9	182.8	268.2	402.2	572.9	828.8	-4.01	0.31
25	100.0	150.0	220.0	330.0	470.0	680.0	-3.90	0.00
30	82.49	123.7	181.5	272.2	387.7	561.0	-3.80	0.30
35	68.41	102.6	150.5	225.8	321.5	465.2	-3.69	0.58
40	57.02	85.54	125.5	188.2	268.0	387.8	-3.59	0.86
45	47.77	71.65	105.1	157.6	224.5	324.8	-3.50	1.13
50	40.20	60.30	88.44	132.7	188.9	273.3	-3.40	1.39
55	33.98	50.98	74.76	112.1	159.7	231.1	-3.31	1.64
60	28.86	43.28	63.48	95.23	135.6	196.2	-3.23	1.88
65	24.61	36.91	54.13	81.20	115.6	167.3	-3.15	2.12
70	21.07	31.60	46.35	69.52	99.01	143.3	-3.07	2.35
75	18.11	27.16	39.84	59.76	85.11	123.1	-2.99	2.57
80	15.62	23.43	34.37	51.56	73.43	106.2	-2.91	2.79
85	13.53	20.29	29.76	44.65	63.59	92.00	-2.84	3.00
90	11.76	17.63	25.86	38.80	55.26	79.95	-2.77	3.21
95	10.25	15.38	22.55	33.83	48.18	69.71	-2.71	3.41
100	8.968	13.45	19.73	29.59	42.15	60.98	-2.64	3.60
105	7.871	11.81	17.32	25.97	36.99	53.52	-2.58	3.79
110	6.928	10.39	15.24	22.86	32.56	47.11	-2.52	3.97
115	6.117	9.176	13.46	20.19	28.75	41.60	-2.46	4.15
120	5.416	8.125	11.92	17.87	25.46	36.83	-2.41	4.33
125	4.809	7.214	10.58	15.87	22.60	32.70	-2.35	4.50
130	4.282	6.422	9.419	14.13	20.12	29.11	-2.30	4.66
135	3.822	5.732	8.408	12.61	17.96	25.99	-2.25	4.83
140	3.420	5.130	7.523	11.29	16.07	23.25	-2.20	4.99
145	3.068	4.601	6.749	10.12	14.42	20.86	-2.15	5.14
150	2.758	4.137	6.068	9.102	12.96	18.76	-2.10	5.29



For complete Curve Computation, visit: www.vishay.com/resistors-non-linear/curve-computation-list/

RESISTANCE VALUES AT INTERMEDIATE TEMPERATURES WITH R_{25} AT (1, 1.5, 2) kΩ					
T_{OPER} (°C)	PART NUMBER NTCLE100E3102***	PART NUMBER NTCLE100E3152***	PART NUMBER NTCLE100E3202***	TCR (%/K)	$\Delta R/R$ DUE TO B_{tol} . (%)
	R_T (Ω)	R_T (Ω)	R_T (Ω)		
-40	23 342	35 013	46 684	- 6.06	1.65
-35	17 336	26 004	34 672	- 5.84	1.49
-30	13 018	19 526	26 035	- 5.62	1.34
-25	9877	14 816	19 754	- 5.42	1.19
-20	7569	11 353	15 138	- 5.23	1.05
-15	5855	8782	11 709	- 5.05	0.92
-10	4569	6854	9138	- 4.87	0.79
-5	3596	5395	7193	- 4.71	0.66
0	2854	4280	5707	- 4.55	0.54
5	2282	3422	4563	- 4.40	0.43
10	1838	2757	3675	- 4.26	0.31
15	1491	2236	2981	- 4.12	0.21
20	1217	1826	2434	- 3.99	0.10
25	1000	1500	2000	- 3.87	0.00
30	826.6	1240	1653	- 3.75	0.10
35	687.3	1031	1375	- 3.63	0.19
40	574.6	861.9	1149	- 3.53	0.28
45	482.7	724.0	965.4	- 3.42	0.37
50	407.4	611.0	814.7	- 3.32	0.46
55	345.2	517.8	690.5	- 3.23	0.54
60	293.7	440.6	587.4	- 3.14	0.62
65	250.8	376.2	501.6	- 3.05	0.70
70	214.9	322.4	429.8	- 2.97	0.78
75	184.7	277.1	369.5	- 2.89	0.86
80	159.3	238.9	318.6	- 2.81	0.93
85	137.7	206.6	275.5	- 2.73	1.01
90	119.4	179.1	238.8	- 2.66	1.08
95	103.8	155.7	207.6	- 2.59	1.15
100	90.45	135.7	180.9	- 2.53	1.22
105	79.00	118.5	158.0	- 2.46	1.29
110	69.15	103.7	138.3	- 2.40	1.35
115	60.66	90.99	121.3	- 2.34	1.42
120	53.32	79.98	106.6	- 2.29	1.48
125	46.96	70.44	93.92	- 2.23	1.55
130	41.43	62.15	82.87	- 2.18	1.61
135	36.63	54.94	73.25	- 2.13	1.67
140	32.43	48.65	64.87	- 2.08	1.73
145	28.77	43.16	57.54	- 2.03	1.79
150	25.56	38.34	51.12	- 1.98	1.85



For complete Curve Computation, visit: www.vishay.com/resistors-non-linear/curve-computation-list/

RESISTANCE VALUES AT INTERMEDIATE TEMPERATURES WITH R_{25} AT (2.2, 2.7, 3.3, 4.7, 5.0, 6.8, 10) kΩ									
T _{OPER} (°C)	PART NUMBER NTCLE100E3222***	PART NUMBER NTCLE100E3272***	PART NUMBER NTCLE100E3332***	PART NUMBER NTCLE100E3472***	PART NUMBER NTCLE100E3502***	PART NUMBER NTCLE100E3682***	PART NUMBER NTCLE100E3103***	TCR (%/K)	$\Delta R/R$ DUE TO B _{tol.} (%)
	R_T (Ω)								
-40	73 061	89 665	109 591	156 084	166 047	225 824	332 094	-6.62	2.79
-35	52 778	64 773	79 167	112 753	119 950	163 132	239 900	-6.39	2.52
-30	38 544	47 304	57 816	82 344	87 600	119 136	175 200	-6.18	2.26
-25	28 443	34 907	42 665	60 765	64 643	87 915	129 287	-5.98	2.02
-20	21 199	26 017	31 798	45 288	48 179	65 524	96 358	-5.78	1.78
-15	15 950	19 575	23 925	34 075	36 250	49 300	72 500	-5.60	1.55
-10	12 110	14 862	18 165	25 872	27 523	37 431	55 046	-5.42	1.33
-5	9275	11 382	13 912	19 814	21 078	28 667	42 157	-5.25	1.12
0	7162	8790	10 743	15 300	16 277	22 137	32 554	-5.09	0.92
5	5574	6841	8362	11 909	12 669	17 230	25 339	-4.93	0.72
10	4372	5365	6558	9340	9936	13 513	19 872	-4.79	0.53
15	3454	4239	5180	7378	7849	10 675	15 698	-4.64	0.35
20	2747	3372	4121	5869	6244	8492	12 488	-4.51	0.17
25	2200	2700	3300	4700	5000	6800	10 000	-4.38	0.00
30	1773	2176	2659	3788	4030	5480	8059	-4.25	0.17
35	1438	1764	2156	3071	3267	4444	6535	-4.13	0.32
40	1173	1439	1759	2505	2665	3624	5330	-4.02	0.48
45	961.8	1180	1443	2055	2186	2973	4372	-3.91	0.63
50	793.2	973.4	1190	1694	1803	2452	3605	-3.80	0.77
55	657.5	806.9	986.3	1405	1494	2032	2989	-3.70	0.91
60	547.8	672.3	821.7	1170	1245	1693	2490	-3.60	1.05
65	458.6	562.8	687.9	979.7	1042	1417	2084	-3.51	1.18
70	385.7	473.3	578.5	823.9	876.5	1192	1753	-3.42	1.31
75	325.8	399.8	488.7	696.0	740.5	1007	1481	-3.33	1.44
80	276.4	339.2	414.6	590.5	628.2	854.3	1256	-3.25	1.56
85	235.5	289.0	353.2	503.0	535.2	727.8	1070	-3.17	1.68
90	201.4	247.2	302.1	430.2	457.7	622.5	915.4	-3.09	1.79
95	172.9	212.2	259.4	369.4	393.0	534.5	786.0	-3.01	1.90
100	149.0	182.9	223.5	318.3	338.6	460.6	677.3	-2.94	2.01
105	128.9	158.2	193.3	275.3	292.9	398.3	585.7	-2.87	2.12
110	111.8	137.2	167.7	238.9	254.2	345.7	508.3	-2.80	2.22
115	97.37	119.5	146.1	208.0	221.3	301.0	442.6	-2.74	2.32
120	85.05	104.4	127.6	181.7	193.3	262.9	386.6	-2.67	2.42
125	74.52	91.46	111.8	159.2	169.4	230.3	338.7	-2.61	2.51
130	65.49	80.38	98.24	139.9	148.8	202.4	297.7	-2.55	2.61
135	57.72	70.84	86.59	123.3	131.2	178.4	262.4	-2.50	2.70
140	51.02	62.62	76.53	109.0	116.0	157.7	231.9	-2.44	2.78
145	45.22	55.49	67.83	96.60	102.8	139.8	205.5	-2.39	2.87
150	40.18	49.31	60.27	85.84	91.32	124.2	182.6	-2.34	2.96



For complete Curve Computation, visit: www.vishay.com/resistors-non-linear/curve-computation-list/

RESISTANCE VALUES AT INTERMEDIATE TEMPERATURES WITH R ₂₅ AT (12, 15, 22) kΩ					
T _{OPER} (°C)	PART NUMBER NTCLE100E3123***	PART NUMBER NTCLE100E3153***	PART NUMBER NTCLE100E3223***	TCR (%/K)	ΔR/R DUE TO B _{tol.} (%)
	R _T (kΩ)	R _T (kΩ)	R _T (kΩ)		
-40	309.4	386.7	567.2	-6.07	7.00
-35	229.5	286.9	420.8	-5.88	6.32
-30	171.8	214.8	315.0	-5.70	5.68
-25	129.8	162.3	238.0	-5.52	5.06
-20	98.93	123.7	181.4	-5.35	4.46
-15	76.02	95.02	139.4	-5.19	3.89
-10	58.88	73.60	107.9	-5.03	3.34
-5	45.95	57.44	84.25	-4.88	2.81
0	36.13	45.16	66.24	-4.74	2.30
5	28.61	35.76	52.45	-4.60	1.80
10	22.80	28.51	41.81	-4.47	1.33
15	18.30	22.87	33.55	-4.34	0.87
20	14.77	18.47	27.08	-4.22	0.43
25	12.00	15.00	22.00	-4.10	0.00
30	9.804	12.25	17.97	-3.99	0.41
35	8.054	10.07	14.77	-3.88	0.81
40	6.652	8.315	12.20	-3.77	1.20
45	5.522	6.903	10.12	-3.67	1.58
50	4.607	5.759	8.447	-3.58	1.94
55	3.862	4.828	7.081	-3.48	2.29
60	3.252	4.066	5.963	-3.39	2.64
65	2.751	3.439	5.044	-3.30	2.97
70	2.337	2.921	4.284	-3.22	3.29
75	1.993	2.492	3.654	-3.14	3.60
80	1.707	2.134	3.129	-3.06	3.91
85	1.467	1.834	2.690	-2.99	4.20
90	1.266	1.582	2.321	-2.92	4.49
95	1.096	1.370	2.010	-2.85	4.77
100	0.9524	1.190	1.746	-2.78	5.04
105	0.8302	1.038	1.522	-2.71	5.31
110	0.7260	0.9075	1.331	-2.65	5.56
115	0.6369	0.7961	1.168	-2.59	5.82
120	0.5604	0.7005	1.027	-2.53	6.06
125	0.4945	0.6181	0.9065	-2.47	6.30
130	0.4375	0.5469	0.8022	-2.42	6.53
135	0.3882	0.4853	0.7117	-2.37	6.76
140	0.3454	0.4317	0.6332	-2.31	6.98
145	0.3080	0.3850	0.5647	-2.26	7.20
150	0.2754	0.3442	0.5049	-2.22	7.41



For complete Curve Computation, visit: www.vishay.com/resistors-non-linear/curve-computation-list/

RESISTANCE VALUES AT INTERMEDIATE TEMPERATURES WITH R ₂₅ AT (33, 47, 50, 68, 100) kΩ									
T _{OPER} (°C)	PART NUMBER NTCLE100E3								
	333***	473***	TCR (%/K)	ΔR/R DUE TO B _{tol.} (%)	503***	683***	104***	TCR (%/K)	ΔR/R DUE TO B _{tol.} (%)
	R _T (kΩ)	R _T (kΩ)			R _T (kΩ)	R _T (kΩ)	R _T (kΩ)		
-40	1116	1589	-6.54	5.74	1833	2493	3666	-6.69	5.88
-35	808.6	1152	-6.34	5.19	1319	1794	2638	-6.49	5.31
-30	591.7	842.8	-6.15	4.66	958.3	1303	1917	-6.29	4.77
-25	437.1	622.6	-5.96	4.15	703.1	956.2	1406	-6.10	4.25
-20	325.9	464.1	-5.79	3.66	520.6	708.0	1041	-5.92	3.75
-15	245.0	349.0	-5.62	3.19	388.9	528.9	777.8	-5.75	3.27
-10	185.8	264.6	-5.45	2.74	293.0	398.5	586.1	-5.58	2.80
-5	142.0	202.3	-5.30	2.30	222.6	302.8	445.3	-5.42	2.36
0	109.4	155.8	-5.14	1.88	170.5	231.8	340.9	-5.26	1.93
5	84.91	120.9	-5.00	1.48	131.5	178.9	263.1	-5.11	1.52
10	66.37	94.53	-4.86	1.09	102.2	139.0	204.4	-4.97	1.12
15	52.24	74.40	-4.72	0.71	80.01	108.8	160.0	-4.83	0.73
20	41.39	58.95	-4.59	0.35	63.04	85.74	126.1	-4.70	0.36
25	33.00	47.00	-4.47	0.00	50.00	68.00	100.0	-4.57	0.00
30	26.47	37.71	-4.35	0.34	39.90	54.27	79.81	-4.45	0.35
35	21.37	30.43	-4.23	0.67	32.04	43.57	64.08	-4.33	0.68
40	17.34	24.70	-4.12	0.99	25.87	35.19	51.75	-4.22	1.01
45	14.15	20.15	-4.01	1.29	21.01	28.57	42.02	-4.11	1.33
50	11.61	16.53	-3.91	1.59	17.15	23.33	34.31	-4.00	1.63
55	9.572	13.63	-3.81	1.88	14.08	19.15	28.16	-3.90	1.93
60	7.931	11.30	-3.71	2.16	11.61	15.79	23.22	-3.80	2.21
65	6.603	9.404	-3.62	2.43	9.623	13.09	19.25	-3.71	2.49
70	5.522	7.865	-3.53	2.70	8.012	10.90	16.02	-3.62	2.76
75	4.639	6.607	-3.44	2.95	6.701	9.114	13.40	-3.53	3.03
80	3.913	5.573	-3.36	3.20	5.629	7.655	11.26	-3.45	3.28
85	3.315	4.721	-3.28	3.45	4.748	6.457	9.496	-3.36	3.53
90	2.819	4.015	-3.20	3.68	4.021	5.469	8.042	-3.28	3.77
95	2.406	3.427	-3.13	3.91	3.419	4.649	6.837	-3.21	4.01
100	2.062	2.936	-3.05	4.13	2.918	3.968	5.835	-3.13	4.24
105	1.773	2.525	-2.98	4.35	2.499	3.399	4.998	-3.06	4.46
110	1.530	2.179	-2.92	4.56	2.148	2.921	4.296	-2.99	4.68
115	1.324	1.886	-2.85	4.77	1.853	2.519	3.705	-2.93	4.89
120	1.150	1.638	-2.79	4.97	1.603	2.180	3.206	-2.86	5.09
125	1.002	1.427	-2.73	5.17	1.392	1.892	2.783	-2.80	5.29
130	0.8757	1.247	-2.67	5.36	1.212	1.648	2.423	-2.74	5.49
135	0.7675	1.093	-2.61	5.54	1.058	1.439	2.116	-2.68	5.68
140	0.6746	0.9608	-2.55	5.73	0.9269	1.261	1.854	-2.62	5.87
145	0.5946	0.8468	-2.50	5.90	0.8141	1.107	1.628	-2.57	6.05
150	0.5254	0.7483	-2.45	6.08	0.7170	0.9752	1.434	-2.51	6.23

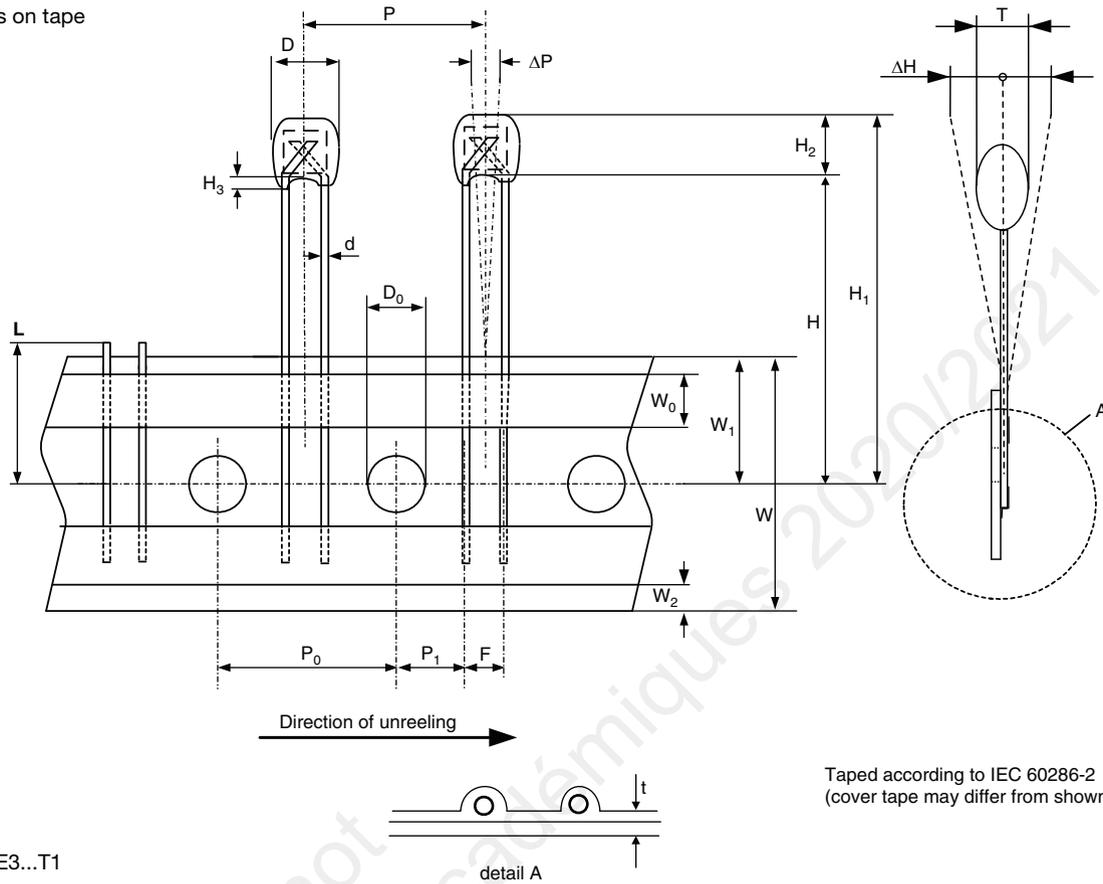


For complete Curve Computation, visit: www.vishay.com/resistors-non-linear/curve-computation-list/

RESISTANCE VALUES AT INTERMEDIATE TEMPERATURES WITH R ₂₅ AT (150, 220, 330, 470) kΩ								
T _{OPER} (°C)	PART NUMBER NTCLE100E3							
	154***	224***	TCR (%/K)	ΔR/R DUE TO B _{tol.} (%)	334***	474***	TCR (%/K)	ΔR/R DUE TO B _{tol.} (%)
	R _T (kΩ)	R _T (kΩ)			R _T (kΩ)	R _T (kΩ)		
- 40	6153	9024	- 6.83	10.22	16 044	22 850	- 7.14	6.41
- 35	4394	6444	- 6.64	9.24	11 282	16 068	- 6.94	5.80
- 30	3168	4646	- 6.45	8.29	8013	11 413	- 6.74	5.20
- 25	2305	3381	- 6.27	7.39	5747	8185	- 6.55	4.64
- 20	1693	2483	- 6.09	6.52	4161	5926	- 6.37	4.09
- 15	1254	1839	- 5.92	5.68	3040	4329	- 6.19	3.57
- 10	936.4	1373	- 5.75	4.88	2240	3190	- 6.02	3.06
- 5	705.0	1034	- 5.60	4.10	1665	2371	- 5.85	2.57
0	535.0	784.7	- 5.44	3.36	1248	1777	- 5.69	2.11
5	409.1	600.0	- 5.29	2.64	942.3	1342	- 5.54	1.65
10	315.1	462.1	- 5.15	1.94	717.1	1021	- 5.39	1.22
15	244.4	358.4	- 5.01	1.27	549.8	783.0	- 5.24	0.80
20	190.8	279.9	- 4.88	0.63	424.5	604.6	- 5.10	0.39
25	150.0	220.0	- 4.75	0.00	330.0	470.0	- 4.97	0.00
30	118.6	174.0	- 4.63	0.60	258.2	367.8	- 4.84	0.38
35	94.42	138.5	- 4.51	1.19	203.4	289.6	- 4.72	0.75
40	75.58	110.9	- 4.39	1.76	161.1	229.5	- 4.59	1.10
45	60.85	89.24	- 4.28	2.30	128.4	182.9	- 4.48	1.45
50	49.25	72.24	- 4.17	2.83	103.0	146.7	- 4.37	1.78
55	40.08	58.78	- 4.07	3.35	83.00	118.2	- 4.26	2.10
60	32.78	48.08	- 3.97	3.85	67.26	95.80	- 4.15	2.41
65	26.94	39.51	- 3.87	4.33	54.79	78.04	- 4.05	2.72
70	22.25	32.63	- 3.78	4.80	44.85	63.88	- 3.95	3.01
75	18.46	27.07	- 3.69	5.26	36.90	52.55	- 3.86	3.30
80	15.38	22.56	- 3.60	5.70	30.49	43.43	- 3.77	3.58
85	12.87	18.88	- 3.52	6.14	25.31	36.05	- 3.68	3.85
90	10.82	15.87	- 3.44	6.56	21.10	30.06	- 3.59	4.11
95	9.129	13.39	- 3.36	6.96	17.67	25.16	- 3.51	4.37
100	7.732	11.34	- 3.28	7.36	14.85	21.15	- 3.43	4.62
105	6.574	9.642	- 3.21	7.75	12.53	17.85	- 3.35	4.86
110	5.610	8.228	- 3.14	8.13	10.62	15.12	- 3.28	5.10
115	4.804	7.046	- 3.07	8.49	9.029	12.86	- 3.21	5.33
120	4.128	6.054	- 3.00	8.85	7.704	10.97	- 3.14	5.55
125	3.559	5.219	- 2.94	9.20	6.597	9.396	- 3.07	5.77
130	3.078	4.514	- 2.87	9.54	5.668	8.072	- 3.00	5.99
135	2.670	3.916	- 2.81	9.87	4.885	6.958	- 2.94	6.20
140	2.323	3.408	- 2.75	10.20	4.224	6.016	- 2.88	6.40
145	2.028	2.974	- 2.69	10.52	3.663	5.217	- 2.82	6.60
150	1.774	2.603	- 2.64	10.83	3.186	4.538	- 2.76	6.79

**PACKAGING
TAPE SPECIFICATIONS**

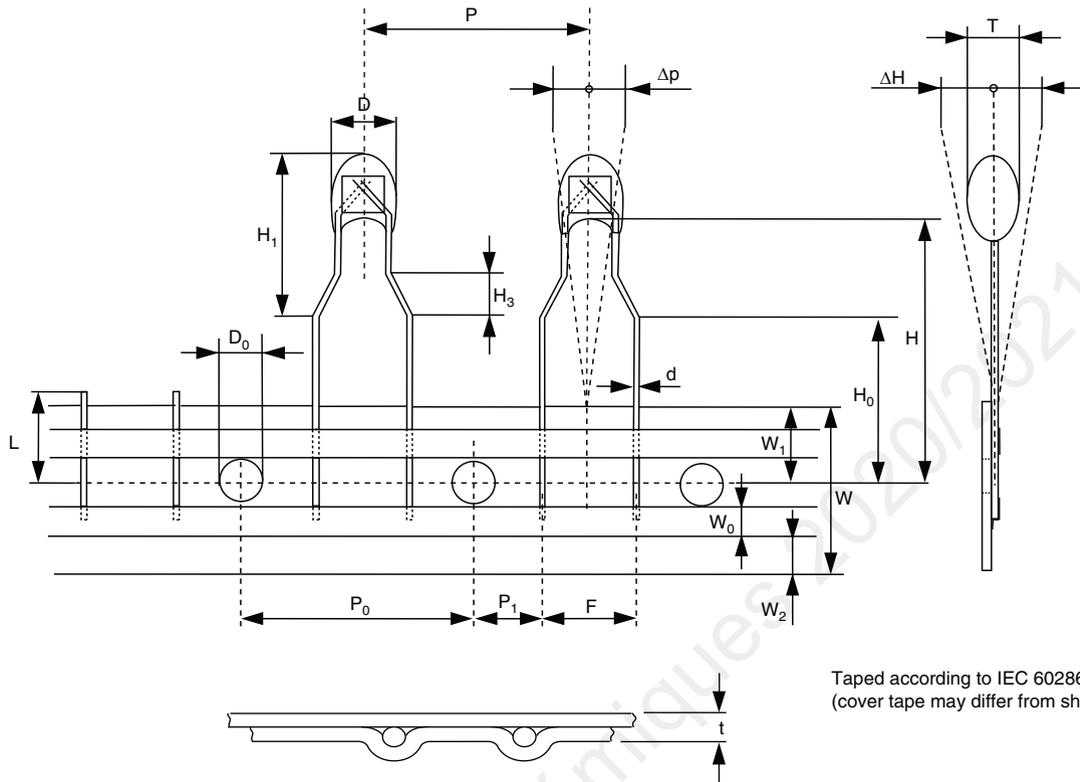
Thermistors on tape


 Taped according to IEC 60286-2
(cover tape may differ from shown)

1E pitch
NTCLE100E3...T1

DIMENSIONS in millimeters				
DETAILS	SYMBOL	DIMENSIONS NOMINAL	TOLERANCE	REMARKS
Body diameter	D	3.3	± 0.5	5 max. for 3.3 Ω to 220 Ω
Lead diameter	d	0.6	± 0.06	
Feed hole diameter	D ₀	4.0	± 0.2	
Lead to lead distance	F	2.54	± 0.3	Guaranteed between component and tape
Distance component to tape centre	H	22.0	± 1.0	1 to 4 max. for 3.3 Ω to 220 Ω
Component height	H ₁	32.2	max.	
Component alignment	Δh	0	± 2.0	
Distance top/bottom of components	H ₂	6	max.	
Length of lacquer under the comp. bottom	H ₃	2	± 1	
Length of snapped lead	L	11.0	max.	
Pitch between thermistors	P	12.7	± 1.0	Cumulative pitch error ± 1 mm/20 pitches guaranteed between component and tape
Feed hole pitch	P ₀	12.7	± 0.3	
Feed hole center to lead center	P ₁	5.08	± 0.7	
Component alignment	Δp	0	± 1.3	
Total thickness	T	3.0	max.	4 max. for 3.3 Ω to 220 Ω with cardboard tape 0.5 ± 0.1
Total tape thickness	t	0.9	max.	
Tape width	W	18.0	± 1.0	None of the hold down tapes may cover the holes
Hold down tape width	W ₀	5.0	± 0.3	
Hole position	W ₁	9.0	± 0.5	
Hold down tape position	W ₂	1.5	± 1.0	

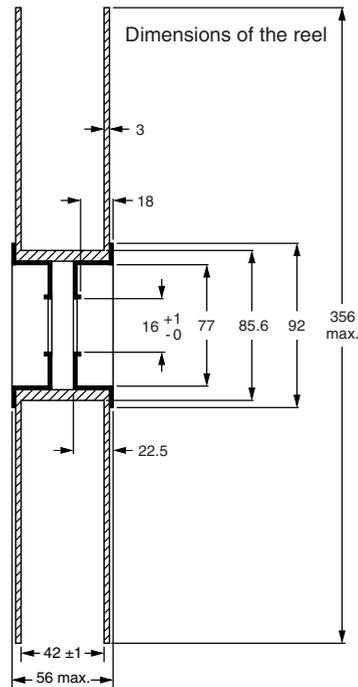
Thermistors on tape


 Taped according to IEC 60286-2
 (cover tape may differ from shown)

2E pitch

NTCLE100E3...T2

DIMENSIONS in millimeters				
DETAILS	SYMBOL	DIMENSIONS NOMINAL	TOLERANCE	REMARKS
Body diameter	D	3.3	± 0.5	5 max. for 3.3 Ω to 220 Ω
Lead diameter	d	0.6	± 0.06	
Feed hole diameter	D ₀	4.0	± 0.2	
Lead to lead distance	F	5.0	+ 0.6 - 0.1	Guaranteed between component and tape
Distance component to tape centre	H	20.0	± 2.0	12 max. for 100 Ω to 220 Ω
Component height	H ₀	16.0	± 0.5	
Component alignment	H ₁	10.0	max.	
Distance top/bottom of components	Δh	0.0	± 2.0	
Length of lacquer under the comp. bottom	H ₃			
Length of snapped lead	L	11.0	max.	
Pitch between thermistors	P	12.7	± 1.0	Cumulative pitch error ± 1 mm/20 pitches guaranteed between component and tape
Feed hole pitch	P ₀	12.7	± 0.3	
Feed hole center to lead center	P ₁	3.81	± 0.7	
Component alignment	Δp	0.0	± 1.3	
Total thickness	T	3.0	max.	4 max. for 3.3 Ω to 220 Ω with cardboard tape 0.5 ± 0.1
Total tape thickness	t	0.9	max.	
Tape width	W	18.0	± 1.0 - 0.5	None of the hold down tapes may cover the holes
Hold down tape width	W ₀	5.0	± 0.3	
Hole position	W ₁	9.0	± 0.5	
Hold down tape position	W ₂	1.5	± 1.0	

REEL SPECIFICATIONS

CODE NUMBERS AND RELEVANT

PARAMETER		Quantity
BULK	NTCLE100E3....B0	500
TAPE AND REEL 1E PITCH ⁽¹⁾	NTCLE100E3....T1	1500 per reel, 2 reels per box
TAPE AND REEL 2E PITCH ⁽¹⁾	NTCLE100E3....T2	1500 per reel, 2 reels per box

CHARACTERISTICS OF TAPED PRODUCTS

Minimum pull-out force of the component: 5 N

Minimum peel-off force of adhesive tape: 6 N

Minimum tearing force tape: 15 N

Minimum pull-off force of tape-reel: 5 N

STORAGE CONDITIONS

Storage temperature range: - 25 °C to + 40 °C

Maximum relative humidity: 80 %, non-condensing

TESTS AND REQUIREMENTS

Essentially all tests are carried out in accordance with "IEC publication 60068-2; Environmental testing", except where indicated.

STABILITY TESTS				
CECC 32 100 CLAUSE	IEC 60068-2 TEST METHOD	TEST	PROCEDURE	REQUIREMENTS
D3; 4.20.1		Endurance	25 °C; 1000 h	$\Delta R/R < 1 \%$
	1	Endurance	- 40 °C; 1000 h	$\Delta R/R < 1 \%$
	539	Endurance	500 mW; 55 °C; 1000 h	$\Delta R/R < 3 \%$ ⁽¹⁾
	2	Dry heat, (steady state)	125 °C; 1000 h	$\Delta R/R < 3 \%$
D1; 4.19	3	Damp heat (steady state)	56 days at 40 °C; 90 % to 95 % RH	$\Delta R/R < 3 \%$
C2; 4.14	14	Rapid change of temperature	- 40 °C to + 125 °C; 50 cycles	$\Delta R/R < 2 \%$
Other applicable tests				
	21	Robustness of leads: Tensile strength Bending	Loading force 10 N Loading force 5 N	$\Delta R/R \leq 1 \%$
	58	Soldering: Solderability Resistance to heat	240 °C max.; duration 4 s max. 265 °C max.; duration 5 s max.	$\Delta R/R \leq 1 \%$ ⁽²⁾
	27	Impact	Free fall; 1 m	$\Delta R/R \leq 1 \%$
	29	Shock	490 m/s; half sinewave	$\Delta R/R \leq 1 \%$
	45	Resistance to solvent (isopropanol)	Ambient temp for 5 minutes; 5 N with hydrophylic cotton wool	No traces of lacquer on cotton wool
	6	Vibration	1.5 mm peak to peak: 10 Hz to 58 Hz 10 gp: 50 Hz to 500 Hz 1 octave/min. 2 h in each direction in three orthogonal directions	No visible damage $\Delta R/R < 1 \%$
	60695-2-2	Inflammability	1980, needle flame test	Non-flammable

Notes
⁽¹⁾ For $R_{25} \geq 100 \text{ k}\Omega$ the drift requirement is $\Delta R/R < 5 \%$
⁽²⁾ For R_{25} from 2.2 k Ω to 10 k Ω , requirement is $\pm 2 \%$ max.



Disclaimer

ALL PRODUCT, PRODUCT SPECIFICATIONS AND DATA ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN OR OTHERWISE.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained in any datasheet or in any other disclosure relating to any product.

Vishay makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of the products for any particular purpose or the continuing production of any product. To the maximum extent permitted by applicable law, Vishay disclaims (i) any and all liability arising out of the application or use of any product, (ii) any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages, and (iii) any and all implied warranties, including warranties of fitness for particular purpose, non-infringement and merchantability.

Statements regarding the suitability of products for certain types of applications are based on Vishay's knowledge of typical requirements that are often placed on Vishay products in generic applications. Such statements are not binding statements about the suitability of products for a particular application. It is the customer's responsibility to validate that a particular product with the properties described in the product specification is suitable for use in a particular application. Parameters provided in datasheets and/or specifications may vary in different applications and performance may vary over time. All operating parameters, including typical parameters, must be validated for each customer application by the customer's technical experts. Product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein.

Except as expressly indicated in writing, Vishay products are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications or for any other application in which the failure of the Vishay product could result in personal injury or death. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so at their own risk. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay. Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.

Material Category Policy

Vishay Intertechnology, Inc. hereby certifies that all its products that are identified as RoHS-Compliant fulfill the definitions and restrictions defined under Directive 2011/65/EU of The European Parliament and of the Council of June 8, 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (EEE) - recast, unless otherwise specified as non-compliant.

Please note that some Vishay documentation may still make reference to RoHS Directive 2002/95/EC. We confirm that all the products identified as being compliant to Directive 2002/95/EC conform to Directive 2011/65/EU.

Vishay Intertechnology, Inc. hereby certifies that all its products that are identified as Halogen-Free follow Halogen-Free requirements as per JEDEC JS709A standards. Please note that some Vishay documentation may still make reference to the IEC 61249-2-21 definition. We confirm that all the products identified as being compliant to IEC 61249-2-21 conform to JEDEC JS709A standards.

Progression Systèmes & Procédés - TSTL SPCL - 30 semaines

L'enseignement du thème « Systèmes et procédés » prend appui sur l'étude de quelques systèmes choisis par l'équipe pédagogique comme supports d'apprentissage. Ces systèmes, réels ou didactisés, peuvent être issus de l'industrie, des laboratoires ou de l'environnement quotidien.

L'objectif est de faire acquérir aux élèves des méthodes d'analyse qui mobilisent leurs connaissances afin qu'ils comprennent et maîtrisent le fonctionnement de ces systèmes. Ce thème permet de mettre en œuvre des démarches de résolution de problème dans un contexte souvent pluridisciplinaire. Il sensibilise aussi les élèves à la prévention et à la maîtrise des risques.

Au cours de l'année, les élèves sont confrontés à plusieurs systèmes, par exemple : traitement de l'eau, chauffage et climatisation, procédés de séparation d'espèces chimiques, production autonome d'électricité, imagerie, etc. La diversité des systèmes étudiés permet de réinvestir les notions travaillées dans l'ensemble des thèmes des programmes des classes de première et terminale pour les enseignements de spécialité de sciences physiques et chimiques en laboratoire et de physique-chimie et mathématiques.

L'étude de ces systèmes permet d'identifier les concepts et modèles physiques ou chimiques pour décrire leur fonctionnement. Les développements théoriques se limitent au strict nécessaire, l'approche reste principalement expérimentale avec des allers-retours réguliers entre modèle et expérience.

Quand le système n'est pas présent dans l'établissement, un travail préliminaire sur un dossier scientifique permet d'en dégager les principales caractéristiques ; certains éléments de ce système peuvent être étudiés à l'aide de montages, de maquettes ou de simulations. C'est aussi l'occasion de sensibiliser aux limites liées au rapport d'échelle entre les dimensions du dispositif réel et celles de la maquette.

Le thème « Systèmes et procédés » est présenté selon trois entrées :

- Analyse et contrôle des flux d'information ;
- Conversions et transferts des flux d'énergie ;
- Transport et transformation des flux de matière.

Cette présentation n'induit pas une progression pédagogique : ces trois entrées ne sont pas indépendantes les unes des autres. L'ensemble des systèmes étudiés au cours de l'année doit permettre d'introduire toutes les notions du programme, les trois entrées étant sollicitées pour chaque système étudié.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Flux de matière, d'énergie et d'informations.	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Pour un système ou un procédé, identifier : <ul style="list-style-type: none"> - La (les) fonction(s) globale(s) réalisée(s) ; - Les flux de matière, d'énergie et d'informations en entrée et en sortie ; - Les principales performances attendues ; - Les impacts environnementaux et sociétaux ; - Les contraintes de sécurité. ➤ À partir du schéma simplifié d'un système ou d'un procédé : <ul style="list-style-type: none"> - Décrire son fonctionnement ; - Identifier les différentes opérations réalisées ; - Identifier les domaines de la physique et de la chimie associés

Thème 1 : Analyse et contrôle des flux d'informations

L'analyse et le contrôle des flux d'informations s'inscrit en continuité avec le thème « Instrumentation » du programme de première. Le conditionnement du signal s'enrichit par l'introduction des filtres caractérisés expérimentalement par leur nature, leur facteur d'amplification et leur bande passante. L'étude de la fibre optique permet de faire le lien avec le thème « Ondes ».

Le programme de la classe de première limite la régulation au tout ou rien (TOR), celui de la classe terminale aborde la régulation continue sans utiliser le formalisme associé qui relève des formations de l'enseignement supérieur. L'intérêt et les limites de la régulation proportionnelle, qui peut facilement être mise en œuvre avec un microcontrôleur, sont abordés expérimentalement, la régulation proportionnelle et intégrale (PI) étant présentée pour corriger les défauts de la régulation proportionnelle sans chercher à étudier le rôle de chacun des paramètres P et I.

Toujours dans le cadre du contrôle des systèmes, l'introduction du moteur pas à pas permet d'élargir les supports de travail. Par exemple, il est possible en prenant appui sur le thème « Image » du programme de la classe de première de construire un modèle expérimental afin de comprendre le fonctionnement d'un système autofocus par détection de contraste.

Chaîne d'informations	- Identifier et décrire la chaîne d'informations du système.
Capteur conditionneur	- Choisir un ensemble capteur conditionneur en fonction du cahier des charges.
Filtrage et amplification de tension.	- Exploiter des résultats expérimentaux pour caractériser un filtre : facteur d'amplification, nature et bande passante
Gabarit.	- Proposer un gabarit de filtre pour répondre au cahier des charges.
Numérisation d'une tension : convertisseur analogique numérique (CAN).	- Citer les caractéristiques utiles d'un CAN : nombre de bits, quantum, fréquence d'échantillonnage.
Fibre optique. Ouverture numérique. Bande passante.	- Déterminer les propriétés d'une fibre optique, à partir d'une documentation. - Expliquer le principe du guidage dans une fibre optique. Transmission, débit.
Transmission, débit.	- Comparer les différents types de transmission de signaux numériques à partir d'une documentation : bande passante, débit.
	Capacités expérimentales :
	- Déterminer expérimentalement le facteur d'amplification et la bande passante d'un filtre.
	- Mesurer l'ouverture numérique et l'atténuation d'une fibre optique.
	- Utiliser une fibre optique pour transmettre une information.
	- Choisir et utiliser, dans un circuit électrique, les appareils de mesure adaptés.

Contrôle des systèmes

Contrôle d'un système ou d'un procédé.

Contrôler une position.
Le moteur pas à pas.
Champ magnétique.

- Exploiter des documents permettant de justifier l'avantage et la nécessité de contrôler un système ou un procédé.
- Citer les sources de champ magnétique.
- Citer quelques ordres de grandeur de la valeur du champ magnétique.
- Expliquer qualitativement le principe de fonctionnement d'un moteur pas à pas.

Capacités expérimentales :

- Mettre en évidence l'existence du champ magnétique et déterminer ses caractéristiques (valeur, sens et direction).
- Modifier un programme pour piloter un moteur pas à pas à l'aide d'un microcontrôleur.

Système de régulation

Boucle de régulation.

Caractéristique statique.

Régulation à action discontinue : TOR.

- Identifier, nommer et connaître la fonction des éléments constitutifs d'une boucle de régulation.
- Identifier les grandeurs réglée, réglante et perturbatrices d'une boucle de régulation sur un schéma.
- Établir le schéma d'une boucle de régulation et indiquer les grandeurs utilisées.

Capacités expérimentales et numériques :

- Tracer la caractéristique statique d'un procédé stable pour une valeur de perturbation.
- Concevoir et réaliser, à l'aide d'un microcontrôleur, un système de détection qui déclenche un signal d'avertissement ou de commande, lorsque la valeur d'une grandeur mesurée atteint un seuil programmable.
- Tracer et exploiter l'évolution temporelle des grandeurs utiles pour des régulations TOR à un seuil et à deux seuils de basculement fixés.

<p>Régulation à action continue, critères de performance.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Comparer l'intérêt relatif d'une régulation à action discontinue et d'une régulation à action continue (avec correcteur PI) dans un contexte expérimental donné, les valeurs des paramètres étant fixées. - Citer les trois critères de performance d'une boucle de régulation : précision, rapidité, stabilité. <p>Capacité expérimentale :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mesurer les critères de performance en boucle fermée, autour d'un point de fonctionnement, suite à un échelon de consigne ou de perturbation : <ul style="list-style-type: none"> - L'écart statique, - Le temps de réponse à 5 % - La valeur du premier dépassement. 	
	<ul style="list-style-type: none"> - Tracer la caractéristique statique du régulateur. - Exploiter la caractéristique statique d'un procédé stable pour déterminer le point de fonctionnement et en déduire l'écart statique. <p>Capacités expérimentales et numériques :</p> <p>Mettre en œuvre un protocole pour étudier :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le déplacement du point de fonctionnement quand la perturbation varie ; - L'influence d'une variation de la correction proportionnelle sur l'écart statique pour un échelon de consigne ou de perturbation. <p>Compléter le programme d'un microcontrôleur pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Piloter un organe de commande, - Contrôler l'évolution d'une grandeur. 	
<p>Correction proportionnelle intégrale (PI).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Citer l'influence d'une correction PI sur l'écart statique. <p>Capacités expérimentales</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mettre en œuvre un protocole pour étudier l'influence d'une variation de la correction intégrale sur l'écart statique, le temps de réponse à 5 % et la valeur du premier dépassement, l'échelon de consigne ou de perturbation étant fixé. 	

3 – ACQUISITION, TRAITEMENT ET TRANSMISSION DU SIGNAL	
Notions et contenus	Capacités exigibles
3.1. Les capteurs	
Capteurs passifs et actifs	Repérer le capteur sur une chaîne de mesure. Déterminer les grandeurs d'entrée et de sortie. Préciser la nature de la grandeur de sortie d'un capteur Préciser le rôle et la nature d'un capteur. Expliquer le rôle d'un capteur
Caractéristiques statique et dynamique	Exploiter les caractéristiques statique et dynamique de capteurs. Justifier le choix d'un capteur. Relever les caractéristiques statique et dynamique d'un capteur.
Principe de fonctionnement de quelques capteurs	Expliquer le principe de fonctionnement de quelques capteurs à partir des lois de la physique en exploitant des ressources.
3.2. Analyse du signal	
Propriétés temporelles	Énoncer qu'un signal périodique peut être considéré comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative. Calculer, dans des cas simples, la valeur moyenne d'un signal à partir de son chronogramme. Exploiter un chronogramme pour déterminer les caractéristiques d'un signal : valeur moyenne, valeurs extrêmes, valeur finale, temps de montée, temps d'établissement, etc. Mesurer les caractéristiques d'un signal.
Propriétés fréquentielles	Énoncer qu'un signal périodique alternatif peut être décomposé en la somme d'un fondamental et d'harmoniques. Exploiter un spectre d'amplitude. Tracer le spectre d'amplitude d'un signal, la fréquence et l'amplitude de son fondamental et de ses harmoniques étant données. Relever le spectre en amplitude d'un signal périodique.
Propriétés énergétiques	Énoncer la définition (aspect énergétique) de la valeur efficace. Calculer la valeur efficace d'un signal sinusoïdal. Mesurer la valeur efficace d'un signal périodique.
3.3. Traitement du signal	
Structure de base : diviseur de tension, pont de Wheatstone ; application au conditionnement des capteurs	Justifier et dimensionner une structure de base.
Comparateur simple et à hystérésis	Justifier le choix du comparateur. Exploiter la caractéristique de transfert du comparateur. Relever la caractéristique de transfert de comparateurs simple et à hystérésis.
Amplification d'une grandeur électrique	Exploiter la caractéristique de transfert : coefficient d'amplification, domaine d'utilisation, etc. Relever la caractéristique de transfert d'un amplificateur.
Filtrage	Choisir le gabarit du filtre adapté à partir des spectres en fréquence du signal d'entrée et du signal de sortie attendu. Exploiter le diagramme de Bode d'un filtre : - nature, fréquence de coupure, bande passante, - détermination du signal de sortie à partir du spectre du signal d'entrée dans les cas simples. Relever le diagramme de Bode d'un filtre.

Conversion numérique analogique	Exploiter la caractéristique sortie/entrée d'un CNA (convertisseur numérique-analogique) et une documentation technique pour déterminer les caractéristiques d'un CNA : résolution, non linéarité, temps de conversion. Relever la caractéristique d'un CNA.
Conversion analogique numérique	Exploiter la caractéristique sortie/entrée d'un CAN (convertisseur analogique-numérique) et une documentation technique pour déterminer les caractéristiques d'un CAN : résolution, non linéarité, temps de conversion. Justifier le rôle d'un échantillonneur bloqueur.
3.4. Transmission du signal	
Chaîne de transmission de l'information	Citer différents types de transmission de l'information. Identifier les différents éléments de la chaîne de transmission sur un exemple donné.
Transmission optique : Réflexion et réfraction de la lumière en optique géométrique. Applications	Appliquer les lois de la réflexion et de la réfraction de la lumière pour justifier un mode de transmission optique. Mettre en œuvre un dispositif de transmission optique.
Transmission numérique	Exploiter une documentation pour présenter un principe de transmission numérique.

4 – SYSTÈMES LINÉAIRES

Notions et contenus	Capacités exigibles
4.1. Modélisation	
Comportement temporel	Repérer le régime transitoire et le régime permanent sur la réponse d'un système linéaire. Exploiter la réponse indicielle d'un système linéaire du premier ordre pour déterminer la transmittance statique et le temps de réponse à 5%. Exploiter la réponse indicielle d'un système linéaire du second ordre pour déterminer la transmittance statique, le temps de réponse à 5% et le dépassement. Relever la réponse d'un système linéaire. Mettre en évidence l'influence du coefficient d'amortissement sur l'allure de la réponse indicielle d'un système linéaire du second ordre.
Comportement fréquentiel Résonance	Exploiter la réponse en fréquence d'un système linéaire du premier ordre pour déterminer sa fréquence de coupure. Mettre en évidence l'influence du coefficient d'amortissement sur l'allure de la réponse en fréquence d'un système linéaire du second ordre. Exploiter la réponse en fréquence d'un système linéaire du second ordre pour déterminer sa fréquence de résonance. Citer des applications du phénomène de résonance.
4.2. Systèmes asservis	
Schéma fonctionnel, chaînes d'action et de retour, correcteur	Identifier sur un schéma blocs : <ul style="list-style-type: none"> ▪ la chaîne directe, la chaîne de retour, le comparateur, ▪ la consigne, l'erreur et la sortie. l'intérêt d'un système bouclé.
Critères de performance d'une boucle d'asservissement	Exploiter l'allure des signaux d'entrée et de sortie pour déterminer le temps de réponse, la précision et le dépassement, préciser si le système est stable.
Correcteur	Mettre en évidence l'influence des 2 paramètres de réglage d'un correcteur PI sur la stabilité et la précision. Mettre en évidence l'influence de l'hystérésis sur un système régulé en TOR.