

Radiateur électrique open source, réparabilité, durabilité, commande, identification de l'isolation pièce

Arnaud SIVERT, Abdel FAQIR

I.U.T de l'Aisne Département Génie Électrique SOISSONS FRANCE

Éduscol
Édité le

11/03/2025

1 - Introduction

En France, 37 % des foyers se chauffent à l'électricité. Parmi les différents types de radiateurs électriques, on trouve les convecteurs installés sous les fenêtres, qui fonctionnent par convection naturelle [9]. Cette dernière est due à la différence de température entre le radiateur et le vitrage, ce qui accélère le mouvement de l'air. Il existe également des radiateurs dits à « chaleur douce » ou à inertie, équipés d'un seul corps de chauffe et utilisant soit un fluide caloporteur, soit une inertie sèche (comme la fonte ou la céramique), permettant de maintenir une température plus stable. Enfin, il y a les panneaux rayonnants utilisés ou la convection naturelle ne peut se faire correctement. En effet, faute de place sous les fenêtres (par exemple à cause des portes fenêtres), ces panneaux rayonnants sont souvent placés sur un mur qui ne permettra pas un mouvement de l'air chaud. Bien que le prix de l'énergie électrique soit relativement élevé (voir figure 1), il reste moins fluctuant que celui des autres sources d'énergies, qui sont davantage influencées par la géopolitique et les taxes. Cependant, l'installation d'un radiateur électrique est simple et peu coûteuse comparée à celle des autres systèmes de chauffage. Normalement la durée de vie des résistances électriques sont relativement longues - 3 à 4 fois celle d'une chaudière gaz, granulé ou fuel. En effet, la résistance électrique d'un radiateur peut durer plus de 40 ans, en particulier si la température ne dépasse pas 300°C. Il y a 40 ans, les thermostats étaient mécaniques, utilisant une bilame, comme le montre la figure 2. Le remplacement du thermostat à bilame, illustré à la figure 3, avait lieu tous les 15 ans, en fonction du nombre de commutations, avec une durabilité de 100 000 cycles et un coût modique, de quelques euros. Avec un thermostat à bilame, la régulation de la température de l'air présentait une variation non négligeable en raison de l'écart entre les températures de «OFF» et de «ON», qui était d'environ 7°C d'hystérésis.

Cependant, des résistances de préchauffage étaient intégrées à la bilame afin de minimiser cet effet d'hystérésis. Les économies d'énergie et le confort ont conduit à l'adoption des thermostats électroniques programmables hebdomadaires, qui ont remplacé les régulations mécaniques, et ce pour un prix inférieur à 10 €

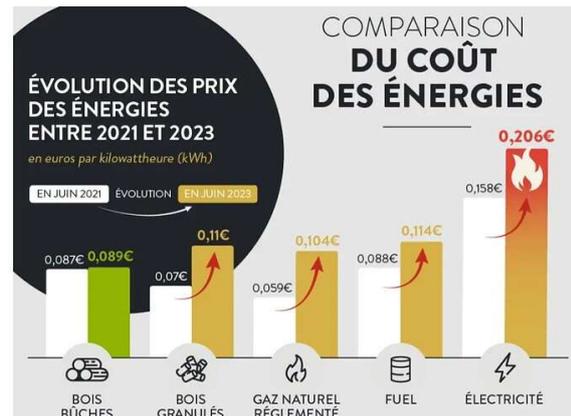


fig 1. Prix de l'énergie en France [4]

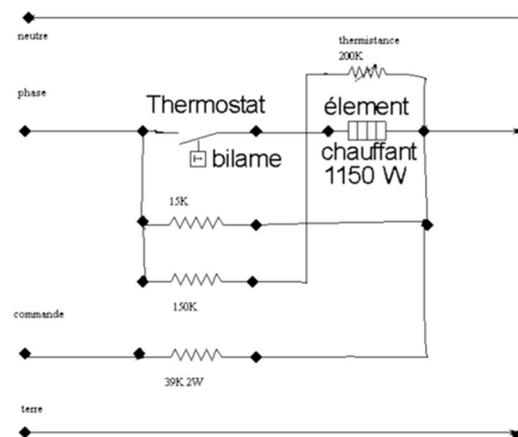


fig 2.: Schéma radiateur avec thermostat mécanique [1]

MP-11-25/40/E121B14H22K

Thermostat, Action instantanée, 40°C, Normalement ouvert, 16A à 125V, 16A à 250V, Montage sur bride

multicomp

Fabricant	MULTICOMP PRO
Réf. Fabricant	MP-11-25/40/E121B14H22K
Code Commande	420570
Gamme de produit	MP Auto-Reset Thermostats N/O
Fiche technique	Data Sheet



fig 3. : thermostat mécanique

De plus, le radiateur électrique est désormais un produit de masse, coûtant généralement moins de 200 € pour une puissance de 2000 W.

Étant donné que le seuil cognitif du coût d'un dépannage est estimé à 30 % du prix d'achat, la réparation de ces radiateurs n'est pas économiquement viable, surtout lorsque le coût de la main-d'œuvre pour la maintenance varie entre 70 et 140 € de l'heure.

Cependant, dans un monde où la durabilité et l'économie des ressources sont essentielles, la réparabilité et la longévité des produits doivent être des critères prioritaires.

La loi anti-gaspillage de 2020 [13], qui prévoit un indice de réparabilité basé sur quatre critères principaux (disponibilité de la documentation, démontabilité, disponibilité et échelle du prix des pièces détachées), n'inclut toujours pas les appareils de type « radiateurs » à ce jour.

Par ailleurs, aucun appareil électroménager est open source à ce jour pour comprendre tous les tenants et les aboutissants d'une réparabilité hardware et software. De plus, très peu de fabricants proposent des garanties supérieures à celles exigées par la loi. En revanche, certains distributeurs offrent des extensions de garantie sous forme d'assurances, représentant 10 à 20 % du prix d'achat, mais celles-ci sont limitées à une durée maximale de cinq ans.

Face à cette situation, les associations de consommateurs jouent un rôle crucial en comparant les différents types de radiateurs, révélant souvent des écarts importants par rapport aux promesses marketing [14]. Ces associations utilisent également des forums pour rassembler les témoignages de consommateurs confrontés aux mêmes problèmes de défaillance ou au même vices cachés.

Enfin, des sites internet tels qu'iFixit [16] proposent des tutoriels de réparation réalisés par des bénévoles. Pourtant, ces tutoriels devraient incomber aux fabricants eux-mêmes pour avoir une bonne légitimité.

Mais quel est le taux de défaillance d'un thermostat électronique ? Comment peut-on déterminer ce taux de défaillance ? Quelles sont les pièces les plus défaillantes ?

Dans tous les domaines cruciaux tels que l'aéronautique, l'automobile et les machines industrielles, le MTBF (Mean Time Between Failures) d'un système est soigneusement étudié pour garantir la sécurité des gens et des systèmes et préserver l'image de marque [5].

Malheureusement, la garantie légale de deux ans incite de nombreux fabricants à ne pas prendre en compte la durée de vie de leurs produits. Cette tendance est particulièrement marquée dans les secteurs très concurrentiels, où les fabricants changent souvent de nom, transférant ainsi la responsabilité de leur réputation aux distributeurs.

De plus, les études de fiabilité sont longues et nécessitent un échantillon de 100 à 1000 unités pour chaque composant afin d'en déduire le taux de défaillance. De plus, à chaque modification du procédé de fabrication d'un composant, sa qualité doit être à nouveau testée.

Pourtant, il existe des calculateurs de MTBF pour les systèmes, utilisant des bibliothèques de valeurs de composants, comme illustré sur la figure

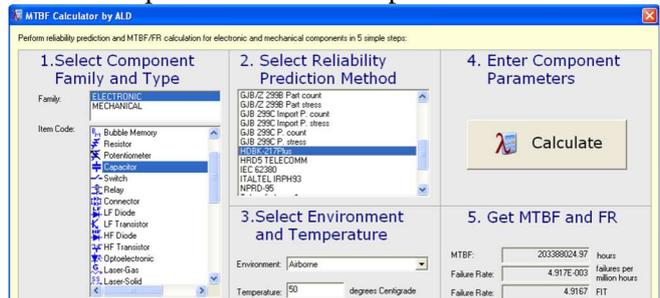


fig 4. Calculateur de MTBF d'un système [6]

suivante. Si le thermostat électronique utilise des relais statique (triac) qui ont une durée de vie de 15 ans donc 2 à 3 fois plus importante que le relais mécanique, il lui faut une alimentation continue pour alimenter les composants qui va permettre la régulation de température [1].

Cette alimentation est filtrée via 2 condensateurs dont le MTBF de 266 000 heures (30 ans). Attention, ce nombre d'heures ne veut pas dire que le condensateur se maintiendra en fonctionnement pendant tout ce temps, mais qu'il n'aura que 37% de probabilité de survivre à un essai de durée égale à ce temps. De plus, ces condensateurs électrolytiques réagissent de manière particulièrement sensible à des températures ambiantes élevées. Chaque augmentation de 10°C réduit la durée de vie des condensateurs électrolytiques par 2, influant donc directement sur la durée de vie de l'alimentation électrique.

Enfin, il faut faire la somme chaque taux de défaillance de tous les composants pour avoir le MTBF du système..

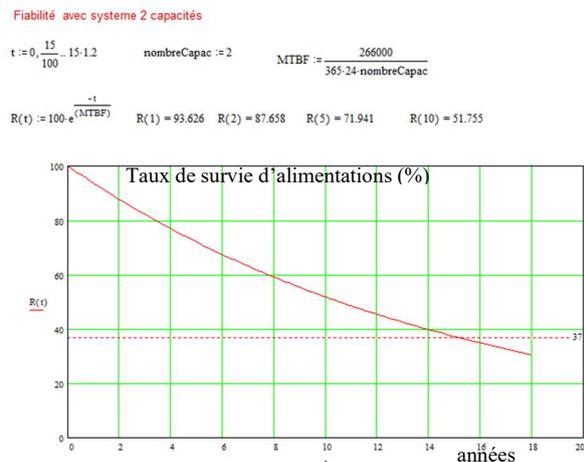


fig 5.Équation et courbe de survie (fiabilité) d'un système avec 2 condensateurs électrochimiques en fonction des années.

Sur la figure 5, le pourcentage du taux de survie d'un radiateur est représenté. Au bout de 5 ans 28% des radiateurs seront en panne à cause de leurs alimentations. D'ailleurs, c'est pour cela que les alimentations de beaucoup de systèmes sont déportés et facile à changer.

Pour le hardware, si en 2025, aucun radiateur a son électronique open source que l'on peut réparer facilement. Les schémas électriques, des cartes propriétaires ne sont pas divulguer par les fabricants pour faire une réparation aux composants près.

Pour le software des thermostats numériques, entre un radiateur « convecteur », « inertiel » et « rayonnant », le programme de la commande est différent car le capteur de température proche du radiateur va être perturbé par sa propre température et ne va pas mesurer la température de l'air correctement.

Il y a de nombreuses questions et choix technologiques à faire pour réaliser un thermostat d'un radiateur électrique open source en permettant de comprendre comment fonctionne la thermie et l'isolation d'une maison ou d'une pièce.

Quel est le meilleur capteur de température pour avoir une bonne précision de la mesure de l'air ? Quelles doivent être les dimensions du radiateur en fonction de la puissance ? Quels types de capteurs de températures ? Quels outils permettent de simuler la commande d'un radiateur ? Quel est le modèle thermique d'une pièce ? Pourrait-on connaître l'isolation de la pièce et identifier son modèle thermique ? Quel microcontrôleur permettrait de faire la régulation de température de l'air et de la limitation de celle du radiateur ? Quelles sont les normes sur la réalisation des radiateurs ?

2 - Les normes

Les normes NF EN 60669 et 61095 [7] demandent une endurance électrique en charge de 100 000 manœuvres sur une charge résistive.

En effet, depuis 30 ans, les relais mécaniques ont été remplacés par des relais à semi-conducteurs surnommés statique (solid state relay=SSR) utilisant des triacs qui ont des durées de vie 10 fois plus grande que le relais mécanique. De plus, les SSR sont silencieux. Mais, il y a des fabricants qui réalisent des SSR peu fiables avec des fausses certifications. Donc, il faut bien choisir son distributeur de composants.

Les normes demandent de faire un « zéro crossing » ou X-crossing [8] lors de la commutation pour minimiser les perturbations électriques sur le réseau. Donc, il y a des optocoupleurs tel que le MOC3041 qui font automatiquement la commutation au zéro crossing mais leur courant max est de 1A d'où l'utilisation de triac en plus pour commuter 16A.

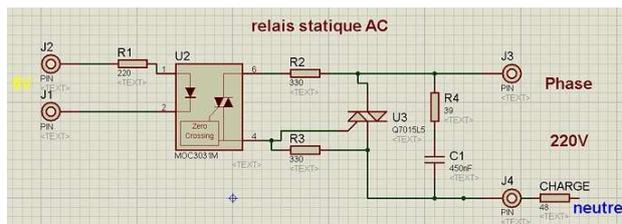


fig 6. Schéma électrique SSR interrupteur statique

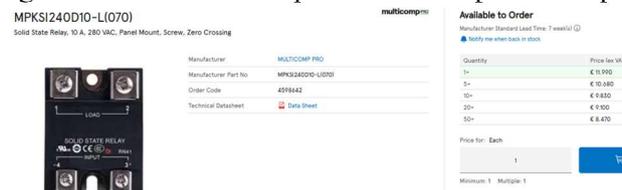


fig 7. Exemple SSR chez un distributeur

Le triac a quelques pertes de chaleurs de 6W pour un courant de 4A. Donc, il faut un dissipateur d'environ de 5°C/W pour dissiper ces pertes qui a un encombrement non négligeable en mm (LxHxl=50x33x46). Par conséquent, certains fabricants utilisent le SSR sans dissipateur pour la commutation zéro crossing et un relais en parallèle pour s'affranchir du dissipateur.



Les normes ne définissent pas la puissance du radiateur en fonction de la grandeur de la pièce. Il n'y a pas de simulateur pour comprendre comment fonctionne la thermie en fonction du choix de son isolation. Pourtant, le modèle thermique est relativement simple à comprendre

3 - Modèle thermique d'une pièce (ordre de grandeur)

Le modèle thermique le plus utilisé d'un habitat est le modèle R3C2, utilisant 3 résistances et 2 capacités. Mais le modèle R4C3 est préférable car il prend en compte la température du radiateur.

Sachant que la conduction, la convection, le rayonnement sont 3 résistances thermiques en parallèles. Dans les matériaux, c'est la conduction qui est pertinente, alors que pour l'air, c'est la convection.

Exemple, pour une pièce de 16m² au sol avec une hauteur plafond de 2.5m avec un lien externe de 24m² de surface, avec des murs isolés avec 0.14m de laine de roche ayant une performance d'isolation 3 m².°C/W donnera une résistance thermique totale de 0.12 °C/W. Une fenêtre double vitrage de 1.5m² va provoquer une résistance de 1.5°C/W qui sera en parallèle avec la résistance précédente donc que l'on pourra négliger.

La convection de l'air vers le placo et la fenêtre est de 10 W/m²°C avec une surface de 48m², cela donne une résistance de 0.2°C/W. mais avec le rayonnement en plus, cette valeur a été divisée par 2.

En général, il y a aussi un renouvellement d'air de 2°C/W par la VMC.

Sachant que toutes les résistances thermiques d'un mur multicouche sont en série mais les autres sont en parallèles donc la puissance moyenne aura l'équation suivante pour maintenir la température désirée de 20°C. Cette puissance devra avoir la valeur suivante avec une température extérieure de 0°C.

$$P_{\text{moy}}(W) = \left(\frac{1}{(R_{\text{mur}} + R_{\text{conv}})} + \frac{1}{R_{\text{VMC}}} \right) \cdot (T_{\text{désirée air}} - T_{\text{externe}})$$

$$101W = \left(\frac{1}{0.12 + 0.1} + \frac{1}{2} \right) \cdot (20^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C})$$

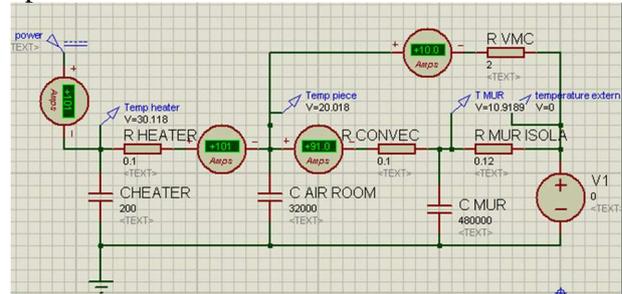


fig 8. Simulation du Modèle thermique R4C3 d'un radiateur avec convection dans l'air dans Proteus ou les « ampèremètres » indique la puissance

La capacité thermique de l'air est de 800 J/°C.kg. Donc pour la pièce précédente de 40m², la valeur de la capacité thermique est de de 32 000 J/°C.

Puis, il y a la capacité thermique du BA13 qui pèse 10kg/m² pour la pièce de 16m² donne une surface de 48m² donc une masse de 480kg donc une capacité d'environ

$$C = 48\text{m}^2 * 10\text{kg/m}^2 * 1000 \text{ J/kg.}^{\circ}\text{C} = 480\ 000\text{J/}^{\circ}\text{C}.$$

Pour observer la dynamique de la température des murs et de la température de l'air pour passer de 0°C à 25°C, une puissance de 404W avec un rapport cyclique de 25% et une période de 180s (3minutes) a été simulé (figure 9). Il faut un temps de 27heures (100k secondes) pour que la température de l'air atteigne celle désirée.

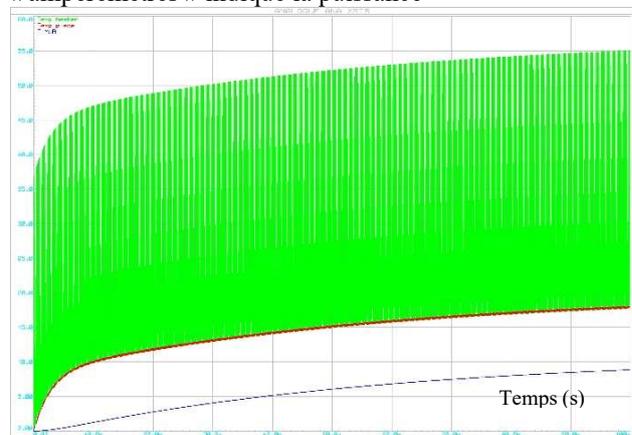


fig 9. Dynamique de la température de radiateur (vert), de l'air (rouge) et des murs (bleu) avec modèle R4C3 de la figure précédente.

On peut observer que la température du radiateur fluctue énormément, mais la température de l'air est filtrée par son inertie thermique. Par sécurité, une limitation de la température du radiateur devra être effectué pour ne pas attendre des valeurs supérieures à 85°C sur sa carcasse et entrainer des brulures humaines.

Par conséquent, en connaissant la puissance moyenne du radiateur pour maintenir la température désirée et la température extérieure, il est possible de connaître la résistance thermique d'une pièce, donc de son isolation. Sachant que plus la différence entre la température du radiateur est l'air est grande et plus la convection est importante et plus le mouvement de l'air sera important donc évitera la stratification des différences de températures dans une pièce en hauteur (fig 14) [15].

Pour avoir une température de radiateur moins de 85°C et une bonne convection, il faut une certaine surface échange entre le radiateur et l'air. D'ailleurs, avec la valeur de la résistance électrique des fils chauffants, une longueur de fil chauffant doit être défini pour une certaine puissance désirée pour être répartie dans la surface du radiateur. Mais **Quelle devra être la longueur de ce fil chauffant ? Quel devra être la forme de cette résistance ?**

4 - Fil résistant chauffant, puissance et surface convecteur

Parfois, c'est la résistance électrique qui est défectueuse, mais elle peut être facilement remplacée, voire fabriquée manuellement. Le fil chauffant est composé d'un alliage de nickel-chrome [3], dont les fabricants indiquent la section, le diamètre, ainsi que les standards SWG (Standard Wire Gauge) ou AWG (American Wire

Gauge). Il existe un compromis entre le diamètre, la longueur et la forme du fil pour atteindre la température souhaitée.

Par exemple, un fil chauffant de 0,45 mm de diamètre possède une section de 0,16 mm², correspond à un calibre de 25 AWG et présente une résistance de 0,225 Ω/cm.

Le fil chauffant peut supporter des températures allant jusqu'à 800 °C sans se détériorer. Toutefois, dans un radiateur, il est conçu pour fonctionner autour de 120 °C afin que la température extérieure du radiateur reste aux alentours de 80 °C, réduisant ainsi les risques de brûlure.

Étant donné que la tension du secteur est fixée à 220V, plusieurs facteurs influencent la puissance du radiateur. Plus la longueur du fil chauffant est grande donc plus sa résistance est élevée et plus la puissance sera réduite. De même, une surface de radiateur plus grande améliore la convection, ce qui entraîne une diminution de la température du convecteur, comme l'illustrent les équations de la figure suivante.

À noter que les radiateurs sans fluide sont plus faciles à réparer, car ils ne comportent pas de joints et de possibilité de fuite.

$$\begin{aligned}
 & \text{diametrefil} := 0.45 & \text{sectionfil} := \pi \cdot \left(\frac{\text{diametrefil}}{2}\right)^2 & \text{sectionfil} = 0.159 & V := 220 \\
 & \text{longueurfilcm} := 400 & \rho := 0.115 & \text{ohm/cm} & \\
 & R := \text{longueurfilcm} \cdot \rho & R = 46 & \text{courant} := \frac{V}{R} & \text{courant} = 4.783 \\
 & \text{power} := \frac{V^2}{\text{longueurfilcm} \cdot \rho} & \text{power} = 1052 & T_{\text{amb}} := 20 & h := 10 \text{ coefficient convection air } W/^{\circ}C \cdot m^2 \\
 & \text{surfaceConvecteur} := 0.7 \cdot 0.7 & \text{Temperatureconvection} := T_{\text{amb}} + \frac{\text{power}}{2 \cdot h \cdot \text{surfaceConvecteur}} & & \\
 & & \text{Temperatureconvection} = 127.365 & &
 \end{aligned}$$

fig 10. Équation de la puissance et de la température en fonction de la longueur de fil résistif et surface convecteur.

Les panneaux rayonnants, quant à eux, fonctionnent à des températures plus élevées afin d'améliorer le rayonnement thermique. Ils sont souvent dotés d'une plaque perforée permettant le passage des rayons infrarouges.

5 - Commande de la résistance.

Pour maintenir une température constante dans la pièce, la résistance doit être réglée en fonction des déperditions thermiques, qui dépendent elles-mêmes de la température extérieure.

De plus, par mesure de sécurité, il est essentiel de limiter la température maximale de la partie métallique du radiateur. Cela permet d'éviter toute surchauffe en cas d'obstruction du convecteur, ce qui réduirait l'efficacité de la convection.

Remarques :

- Un radiateur sèche serviette sans fluide de 500Watts a 20 résistances de 25Watt, il est prévu d'être recouvert. (Ce type de radiateur a beaucoup de fils électriques mais s'il a une résistance défectueuse cela ne se verra pas). Mais il existe aussi des radiateurs sèche serviettes inertielles à une résistance.
- Les convecteurs à fluide ou céramique ont une seule résistance et ils ne sont pas prévus d'être recouvert.
- Le panneau rayonnant de 1000 Watts aura une température interne bien plus haute que les autres radiateurs avec une valeur de 214°C sur la figure 13. Ce type de radiateur aura une grille de protection très aérée pour sécuriser l'humain de brûlure, ou d'incendie.

La commande de la résistance électrique est surnommée tout ou rien de puissance. Si l'utilisation de relais demandait une commutation via une hystérésis de commande. Un interrupteur statique n'a pas besoin de cette hystérésis. Par contre, la température de la pièce va



fig 11. Température max de radiateur sèche serviette à une température ambiante de 20°C



fig 12. Température max de radiateur inertiel

dépendre surtout de la précision du capteur et de son placement. De plus, le capteur doit être petit, pour que sa capacité thermique soit faible et donc son temps de réaction rapide.

Pour bien mesurer la température de la pièce et pour ne pas être biaisé par la température du rayonnement du radiateur, le capteur doit être placé le plus bas possible et le plus loin du radiateur.

Il existe une multitude de capteur de température, :

- semi-conducteur tel que le LM 35 boîtier TO220 vissable, 0.1€
- Les thermo-résistances linéaire tel que PT1000, 5€
- Les thermistances NTP (négative Température Coefficient) dont la résistance diminue en fonction de la température de façon exponentielle, 0.1€
- Un thermistor PTC (positive Température Coefficient) tel que kty81, 0.1€
- Les thermocouples qui peuvent mesurer des températures supérieures à 1000°C mais avec très peu de sensibilité, 5€
- Capteur de Température à infrarouge sans contact, tel que MLX906, 3€ [10]
- Capteur semi conducteur avec communication I2C tel que AHT10 ± 0.3 ° C.

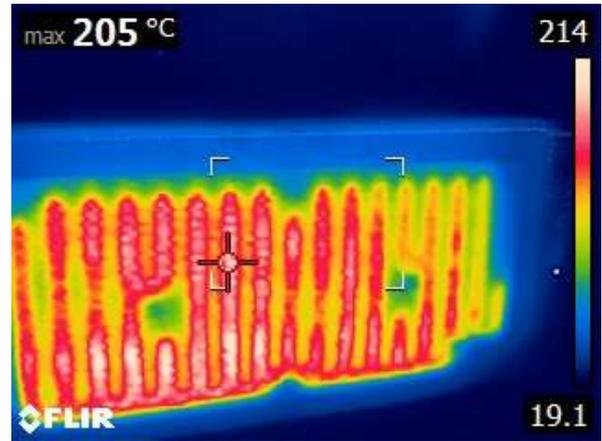


fig 13. Température max radiateur rayonnant

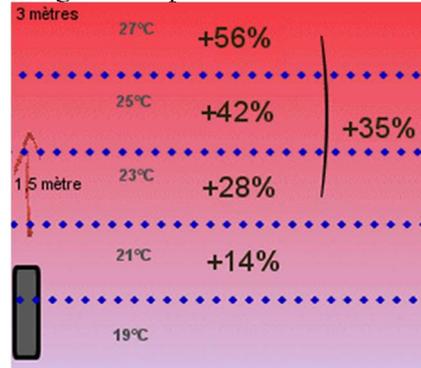


fig 14. Stratification de la température en fonction de la convection naturelle dans une pièce [9].

Si les capteurs PTC sont bon marchés, leur erreur de mesure est de 5 à 6°C donc demande un étalonnage ce qui n'est pas judicieux pour une fabrication industrielle. Car l'étalonnage demande du temps de mise en œuvre et de test donc va augmenter les coûts de la fabrication.

Les thermo-résistances tel que la PT1000 ont une sensibilité très faible et doivent utiliser un pont de Wheatstone avec un amplificateur minium de 10.

Le thermo semi conducteur LM35 a une bonne précision avec un bonne sensibilité 10mV/°C mais s'il y a une variation de sa tension d'alimentation alors la mesure de la température va varier. Avec un convertisseur analogique, la précision de la mesure de température correspondra à l'équation suivante avec un convertisseur analogique numérique sur 10 bits.

$$\text{Précision } (^\circ\text{C/dec}) = \frac{5V}{\text{Sensibilité} \cdot 2^{10}} = 0.5$$

Avec ce capteur, la régulation de température peut être simulé dans Proteus via des ponts diviseurs image de ce capteur via le modèle thermique de la pièce.

On peut observer que la température du radiateur a une fluctuation importante en fonction de l'hystérésis choisi car la constante thermique du radiateur est faible par rapport à la constante thermique de l'air.

La simulation de la thermie n'est pas si viable avec Proteus car ce soft ne supporte pas de couper des alimentations de courant. D'ailleurs, la source de puissance I2 devrait être à 0W mais il a fallu tricher et le mettre à -625Watt avec une mesure de courant AC alors qu'il devrait être en DC. En trichant, la régulation de la simulation fonctionne est correspond à la pratique. Ces bugs ont été signalés au producteur de ce soft mais ils ne sont pas encore corrigés à ce jour dans les dernières versions. Sur la figure 15, on peut observer la simulation

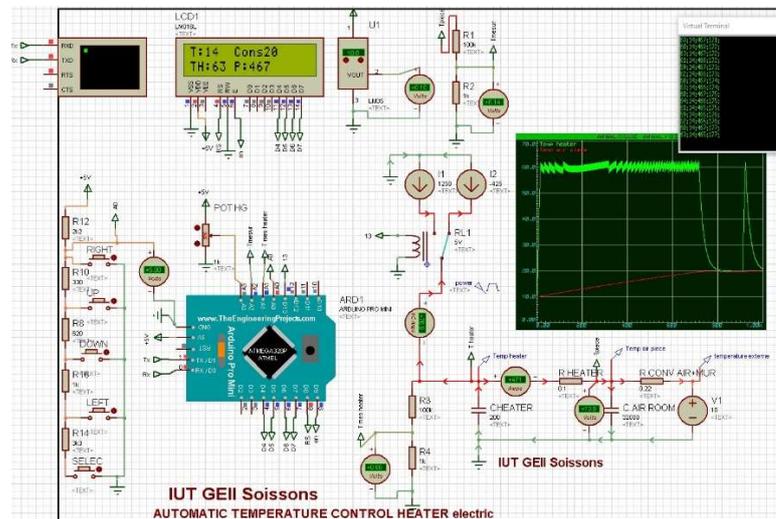


fig 15. Simulation de la régulation de la température du radiateur à 60°C et de l'air avec pont diviseur image de la température de capteur LM35.

avec la puissance moyenne qui diminue lorsque la température de la pièce est à 20°C pour converger vers la puissance suivante

$$\Delta T / R_{TH_{conv}} (20^{\circ}\text{C}-10^{\circ}\text{C})/0.22=P_{moyenne}=45\text{W}$$

La simulation peut être vérifiée à partir d'équations. Pour mettre en chauffe le radiateur, il est facile de déterminer l'énergie qu'il faut, avec l'équation suivante

$$\text{Energie (W.h)}=C_{th}(\Delta T)/3600=200.(60^{\circ}\text{C}-10^{\circ}\text{C})/3600=2.77\text{W.h}$$

À partir de cette énergie, il est possible de déterminer le temps pour atteindre les 60°C avec une puissance de 1000Watt à partir de l'équation suivante

$$\text{temps chauffe convecteur}=\text{Énergie (Joule)}/\text{Power}=(2.7*3600)/1000\text{W}=10 \text{ secondes.}$$

Pour réchauffer l'air de la pièce, il faudra l'énergie suivante

$$\text{Energy (Wh)}=C_{th}(\Delta T)/(3600)=32000.(20^{\circ}\text{C}-10^{\circ}\text{C})/3600=88\text{W.h}$$

La puissance pour garder la température du radiateur à 60°C du radiateur va varier de 500W à 400W à partir de l'équation suivante

$$\Delta T / R_{TH_{heater}}=(60^{\circ}\text{C}-10^{\circ}\text{C})/0.1=P_{moyenne}=500\text{W}$$

Par conséquent, le temps pour réchauffer l'air de la pièce correspondra à la valeur suivante comme on peut l'observer en simulation.

$$\text{Temps air}=\text{Énergie (Wh)}/\text{Power(W)}=(88)/450\text{W}=704 \text{ secondes}$$

A l'inverse avec les temps de mesures en réel, il est possible d'identifier le modèle thermique facilement.

Les capteurs de températures CTN ont une précision de 0.2°C via une résistance de pull up ou down. Étant donné que la conversion analogique dépend de la source d'alimentation si la tension d'alimentation fluctue alors la mesure de la température ne sera pas impactée comme on peut l'observer dans l'équation de la valeur décimale du microcontrôleur 10 bits.

Le choix de la valeur de la CTN est une 10kohm à 25°C avec un coefficient β de 3870 pour avoir une faible consommation venant de l'alimentation. Pour avoir le plus de sensibilité à 25°C, la résistance a été un pull up de même valeur que la CTN.

Autour de 20°C, la sensibilité est déterminée par l'équation suivante

$$\text{Sensibilité}=\frac{\Delta T(^{\circ}\text{C})}{\Delta \text{decimal}} = \frac{-1}{11.25}^{\circ}\text{C}/\text{Dec}$$

Ce qui correspond au coefficient directeur de la pente de la mesure de la température en fonction de la valeur décimale lu par le microcontrôleur. Donc, une précision au dixième près, ce qui est très satisfaisant.

Sur la figure suivante, on peut remarquer que l'équation pour obtenir la température d'une CTN peut être facilement linéarisé.

Mais avec ce capteur de température, il ne sera pas possible de faire la régulation dans Proteus pour être simulé.

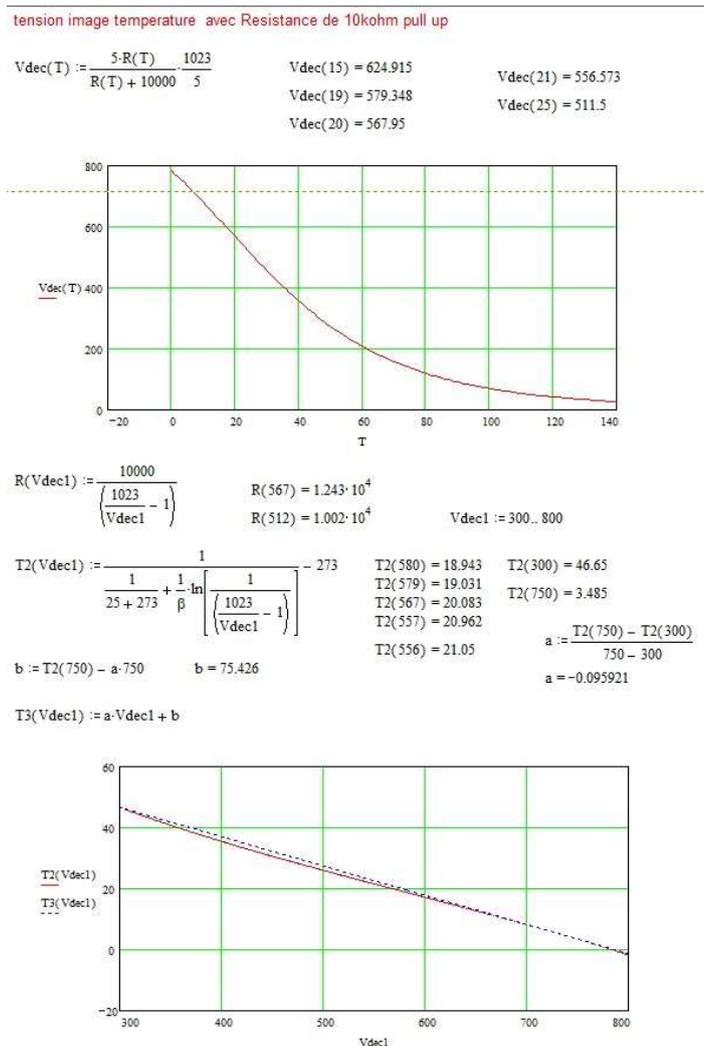


fig 16. Équation pour avoir la température d'une CTN

Les mesures thermiques sont relativement longues pour que les températures atteignent les régimes établis désirées. Mais, la simulation permet de vérifier les choix de programmation et de bien comprendre les dynamiques de températures du radiateur et d'une pièce en quelques secondes de calculs d'ordinateur.

Quelle devra être la période d'échantillonnage de mesure de température ? faut-il filtrer la mesure ? Quelle est l'influence d'une hystérésis sur la commande ? Quelle est l'influence d'un retard de mesure de température sur les dynamiques ?

En effet, plus un capteur de température est gros et plus il y aura de retard de mesure dû à la conduction thermique. D'ailleurs, le petit boîtier To 220 du capteur LM35 a un temps de retard de 5s. Attention, il ne faut pas confondre « retard » et « constante de temps » qui a souvent une dynamique exponentielle.

5.1 - Régulation de température de l'air et du convecteur.

Pour bien comprendre la régulation de température, il est possible de simuler sous Scilab ou Simulink, les dynamiques de la température de l'air et du radiateur avec et sans retard de la mesure dû aux capteurs.

Étant donné que le temps du radiateur est de 10s pour atteindre 60°C, une période d'échantillonnage de 1s est un minimum mais un petit microcontrôleur tel que l'ATMEL 328 peut faire 1ms d'échantillonnage. Donc le choix d'une période de 1s ne sera pas problématique. Avec ce choix de période d'échantillonnage faible devant les constantes de temps, ce ne pas la peine de faire une simulation discrétisée.

Dans un premier temps, seule la régulation température de l'air à 20°C sera effectuée.

Étant donné que la constante thermique ($RTH \cdot CTH$) de l'air est très importante par rapport à celle du radiateur par simplification alors 2 fonctions de transfert de Laplace indépendante modéliseront la température de l'air et du radiateur.

La fonction de transfert du radiateur ou de l'air peuvent être mise sous l'équation suivante

$$\frac{\Delta T(^{\circ}C)}{Power(W)}(s) = \frac{RTH}{1 + RTH \cdot CTH \cdot s}$$

Sur la figure 17, la modélisation de la régulation est présentée. La courbe verte correspond à la puissance de 1000W mais avec une échelle de 20 et commander par une hystérésis de 0.2°C, la courbe en jaune est la température du radiateur, la courbe rouge est la température de l'air, la courbe noire est celle de l'énergie en W.h.

Sur la figure 18, la limitation de température du radiateur à 60°C a été ajoutée à la régulation de la température de l'air à 20°C. Donc, la température du radiateur oscille autour de 60°C et n'atteint plus les 100°C comme auparavant.

Un retard de mesure de température de 5s a été ajouté. Ce temps de retard est dû au capteur mais aussi à la fixation sur une ailette du radiateur qui est assez éloigné de la résistance chauffante.

On peut observer sur les courbes figure 15 que le retard de la mesure provoque une fluctuation importante de la température du radiateur autour des 60°C désirés.

Mais, cette fluctuation de la température du radiateur n'entraîne pas trop de fluctuation de la température de l'air.

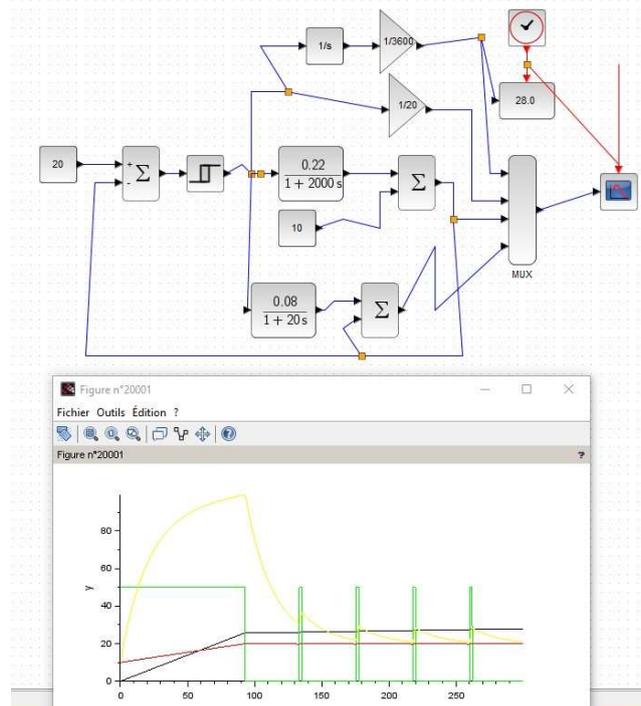


fig 17. Régulation de la température de l'air (Scilab) avec température externe de 10°C.

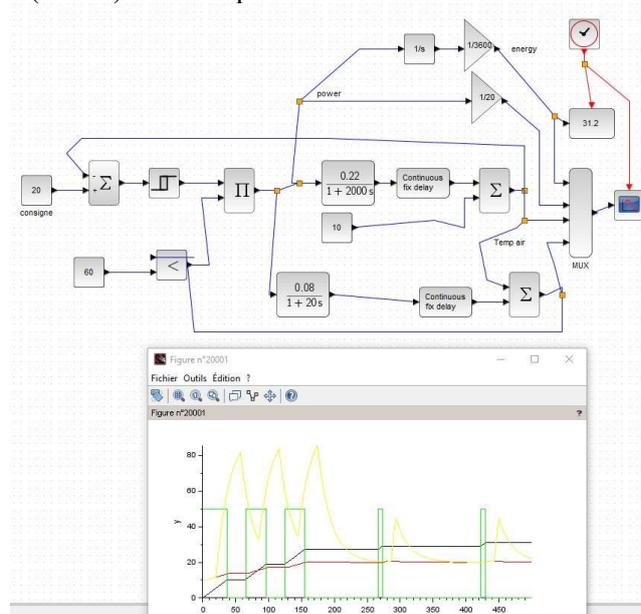


fig 18. Régulation de la température de l'air (Scilab) avec température externe de 10°C.

Grace à ces multiples simulations rapides, la compréhension de la commande est aisée mais il faut que le modèle thermique soit correcte. Pour ce faire, des tests réels doivent donc être effectués pour ajuster le modèle et de valider la commande (régulation, limitation...).

De plus, il y a aussi la régulation hors gel lorsque la température descend en dessous de 7°C avec une hystérésis en générale de 3°C qu'il faudra effectuer.

Sur la figure suivante, on peut observer la dynamique d'un radiateur inertiel de 1000W qui a une constante de temps de 1800 secondes.

Étant donné que le capteur est sur une des ailettes du radiateur, il y a un retard de la mesure de 150 secondes entre la puissance électrique active et le début ou la mesure.

Il y a aussi une différence de température de 15°C entre les parties les plus chaudes et la température de l'ailette du radiateur ou est pris la mesure.

Sur la courbe, on peut observer la précision de 0.5°C sur la température du radiateur avec un LM35 qui est limité à une valeur de 45°C et ou il y a une fluctuation de ±5°C .

De plus, on peut observer que la température de l'air est légèrement fluctuante ainsi que le mesure de puissance moyenne.

Mais comment est-il possible de mesurer la puissance moyenne ?

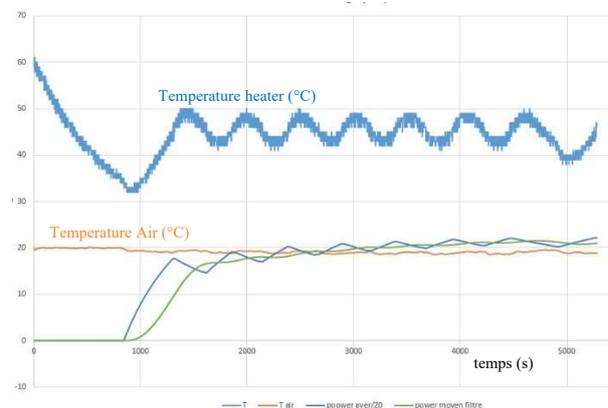


fig 19. Convecteur inertiel de 1000W avec régulation de la température de l'air à 19.8°C et limitation à 60°C.

5.2 - Mesure de la puissance moyenne

Sur les courbes précédentes, on peut observer que la commutation de la puissance peut se faire sur une période assez longue de 3 à 5 minutes avec un rapport cyclique faible. Le rapport cyclique est temps de chauffe sur la période. Cette période et ce rapport sont différents lors de la montée en température et lors du maintien en température.

Il existe différentes façons pour déterminer une valeur moyenne en numérique dit glissante ou mobile (avec pondération, ou sans pondération...). Mais ces moyennes demandent un nombre de variables importants pour avoir une bonne précision. Mais il est possible de faire la somme de la puissance lorsque la résistance chauffe avec T_e la période d'échantillonnage comme dans l'équation suivante :

$$\text{Puissance}_{\text{moyenne}} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} P_{n-k} = \frac{1}{\sum \Delta T_e} \sum P \cdot \Delta T_e = \frac{\text{energie consommée}}{\sum \Delta T_e}$$

En programmation, il est facile de déterminer le temps de chauffe, le temps d'arrêt et l'énergie consommée pour déterminer la puissance moyenne.

Par contre, avec la méthode précédente, il restera une fluctuation de la mesure de la puissance moyenne. Par conséquent, un filtrage de la mesure de la puissance moyenne doit être effectuée pour atténuer cette fluctuation. De même, un filtrage numérique de la température de l'air peut être réalisé pour atténuer l'interaction du corps de chauffe sur le capteur de température.

Mais quelle est la possibilité d'atténuation d'un filtre passe bas numérique ? comment se programme un filtre numérique ? comment choisir la fréquence de coupure du filtre ?

5.3 - Filtrage de la température de l'air et de la puissance moyenne

Beaucoup de thermostat de radiateur n'affiche que la consigne de température et pas la température de l'air à cause de sa fluctuation. Par contre les thermostats déportés avec commande par fil pilote ou radio fréquence affiche la consigne et la température de la pièce.

Il faut s'avoir que plus l'ordre de du filtre numérique est important et plus ces coefficients doivent être précis. De même, plus la fréquence de coupure est petite par rapport à la fréquence d'échantillonnage et plus les coefficients doivent être aussi précis. Or, le compilateur Arduino ne prend que 7 chiffres significatifs au niveau de la virgule flottante. Il existe de nombreuses méthodes pour déterminer les valeurs d'un filtre numérique qui sont présentés et vulgarisés dans le forum Arduino avec leurs limites de calcul et comment les tester [11].

La fréquence de coupure devrait être inférieure à la fréquence des commutations de la puissance (0.01Hz le choix de notre commande). Mais une fréquence de coupure trop petite entraîne un « retard » de la mesure. Donc, il faut un compromis entre l'atténuation désirée et le retard.

Il n'y a pas que la commutation de la puissance qu'il faut filtrer, il y a aussi le « bruit » qui est la perturbation électromagnétique de notre environnement ou il y a beaucoup de système électrique.

Avec une fréquence d'échantillonnage de 1 seconde et un choix de fréquence de coupure de 0.008Hz, donc une constante de temps 125s, avec un filtre du deuxième ordre numérique alors le gain du filtre doit avoir une valeur 1333 avec 4 chiffres significatifs.

Les équations du filtre numérique, les valeurs des coefficients et son étude fréquentielle sont représentées sur la figure suivante.

Si les commutations sont à 0.01Hz alors l'atténuation de l'amplitudes des oscillations sur la puissance moyenne sera alors de 0.4, si les commutations sont de 0.02Hz, l'atténuation sera de 0.1.

Un filtre du troisième ordre aurait permis d'avoir plus d'atténuation mais avec 7 chiffres significatif, il y a une divergence des calculs du filtre. Donc, il faudrait un compilateur ou programmer différemment la virgule flottante.

Le filtre précédent a été utilisé pour filtrer correctement la mesure de température.

Mais, sur la figure 21, la puissance moyenne fluctue avec une période de 500s. Par conséquent une période d'échantillonnage de 10s a été choisi pour avoir donc une constante de temps de coupure de 1250s, pour avoir la mesure de la puissance moyenne, utilisant les mêmes valeurs que le filtre précédent.

D'ailleurs, sur la figure 21, on peut observer que l'atténuation de la fluctuation de la puissance moyenne permet d'avoir une valeur moyenne correcte.

Donc, il faut faire de nombreux tests pour valider le bon fonctionnement des mesures de l'air et des régulations.

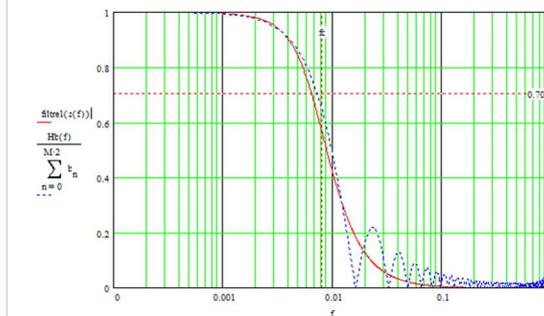
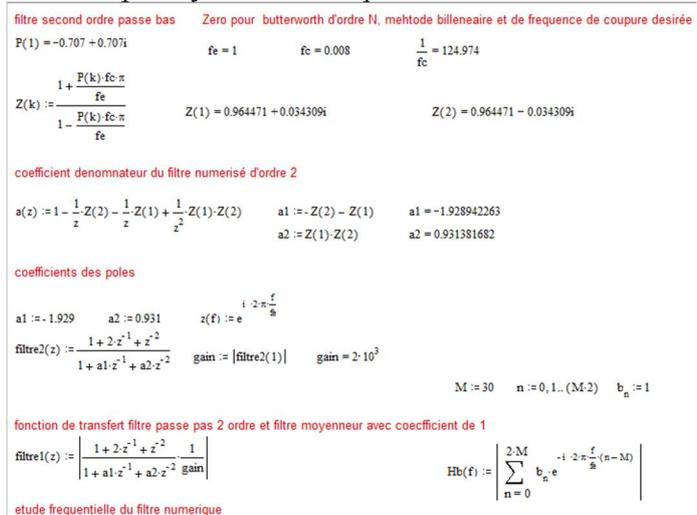


fig 20. Équation et courbe atténuation filtre numérique Butterworth passe bas du second ordre

6 - Mesures, tests et différentes commandes

Avec le radiateur inertiel de 1000W, la figure suivante présente les dynamiques de la régulation de la température en réel de l'air lorsque la consigne est atteinte avec le filtre numérique du second ordre présenté précédemment.

La fluctuation de la température de l'air est de 0.1°C malgré les commutations de chauffages et l'amplitude de la température du radiateur est de 5°C.

La période de commutation en régime établie de la puissance est d'environ de 200s.

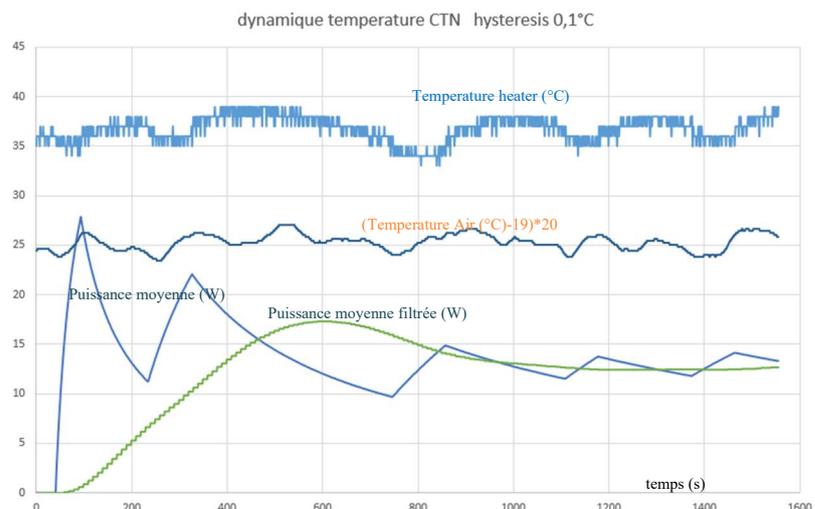


fig 21. Dynamique de la température de l'air avec une consigne de 20.25°C avec une hystérésis de 0.1°C

On peut observer les commutations avec les variations de la puissance moyenne et celle qui est filtrée.

Donc la puissance moyenne filtré donne une puissance bien constante de 250W avec une température extérieure de 5°C. Par conséquent, la résistance thermique de la pièce est de 0.061°C.W

Plus la résistance thermique de la pièce sera grande et plus la pièce est bien isolée donc moins il faudra de puissance.

Si la mesure de la température de l'air n'est pas très précise alors pour faire la régulation, une commande à logique floue [18] est utilisé par certains fabricants. Donc, il n'y a pas qu'une seule solution pour programmer et réaliser un thermostat électronique pour avoir une température constante et un certain confort.

Si le thermostat électronique ne fonctionne plus, des composants de sécurité doivent être ajoutés pour éviter incendie ou brûlure.

7 - Composants et matériaux de sécurité pour radiateur électrique.

Malgré les 2 régulations de températures, une bilame mécanique (fig 3) ré-armable automatiquement a est mis en série avec les résistances pour couper l'alimentation secteur si la température dépasse 90°C.

De plus, des fils électriques sont garnis de gaine silicone supportant 300°C ou gaine en fibre de verre résistant à 450°C ignifugé correspondant à la classe isolation H [12]

Certains constructeurs au nom de la sécurisation de l'isolation électrique dû à la dangerosité du danger électrique utilisent des vis spécifiques ou des soudages des plastiques ultra son pour ne pas être démontable donc réparable.

8 - Programmation, affichage, thermoception, cout

La programmation avec un petit microprocesseur à 1€ tel que l'Atmel 328, avec un paramétrage hebdomadaire ne prend que 30% de sa mémoire. D'ailleurs, sur le forum Arduino [2], il y a différents programmes en fonction d'un besoin ainsi que différents microprocesseurs via plusieurs cartes électroniques pour mesurer les températures avec des relais statiques pour faire un thermostat open source.

Le thermostat a écran surnommé aussi IHM (interface homme machine) permet de vérifier la température par rapport au sentiment de chaleur.

En effet, le sentiment de chaleur est subjectif et va dépendre de son activité physique durant sa journée. Ce sentiment est surnommé la thermoception qui dépend aussi du temps passé au froid, de la couche de graisse de la personne, de son habillement...). Attention, ne pas confondre thermoception et « thermorécepteurs » qui sont des récepteurs cutanés pour réguler la température corporelle. De plus, si l'on a froid aux extrémités corporelles, c'est que le corps n'arrive pas réchauffer ces parties cruciales, donc que l'isolation corporelle est trop faible par rapport à la température de l'air [19]. Par conséquent, l'affichage de la température de l'air et de la consigne permet d'avoir une valeur objective. De plus, cet écran permet de rassurer le consommateur du bon fonctionnement du radiateur.

Un microcontrôleur avec son affichage est un produit de masse et ne coûte que 7€ avec une durée de vie de 15 ans. Donc, ce n'est pas l'écran qui va diminuer l'obsolescence du thermostat.

De plus, le microcontrôleur permet de faire de la domotique via une application smartphone. Si la domotique est un gadget pour de nombreux clients, certains clients sont sensibles à la technologie numérique surtout si son coût est faible.

Si la programmation prend du temps, son coût est négligeable pour à un produit de masse. D'ailleurs, la répartition du coût payé par le consommateur est représentée sur la figure 24 qui démontre que le coût de l'ingénierie est négligeable.



fig 22. Microcontrôleur vendu avec afficheur et module Bluetooth et wifi



fig 23. Supervision de la température du radiateur, de la température en fonction du temps sur smartphone

C'est la partie commercialisation et marge distributeur qui font le coût le plus important d'un produit de masse environ 50% du prix d'achat.

De nombreux objets manufacturés ont cette même répartition du coût d'un produit.

Cette répartition des coûts est peu connue par le grand public. D'ailleurs, souvent le distributeur ou l'artisan va rechercher la plus grande marge possible sur l'objet. Sachant que l'artisan va diminuer son prix de montage sur le devis, pour remporter le marché par rapport à ses concurrents.

Cette recherche de marge du distributeur est souvent au détriment de la qualité de l'objet sachant que la concurrence de vente est faible.

Mais ces dernières années, la vente en ligne des produits manufacturés change la donne. Par contre, l'artisan va essayer de garder une certaine qualité pour ne pas être ennuyé par ces clients et garder une certaine notoriété.

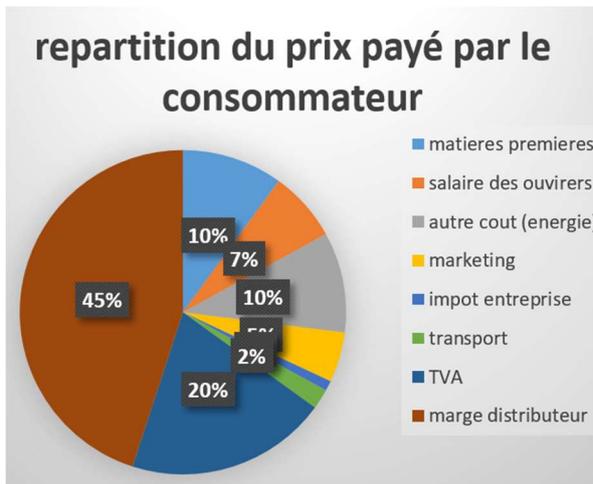


fig 24. Répartition du prix payé par le consommateur d'un objet manufacturé tel qu'un radiateur électrique.

9 - Conclusion

La politique socio-économique de nos objets manufacturés est un enjeu majeur, tant pour la gestion des ressources que pour le pouvoir d'achat [17]. Pourtant, à ce jour, la protection des consommateurs reste insuffisante et les pouvoirs publics restent indifférents face aux réglementations inadaptées.

Une bonne connaissance des principes thermiques et du fonctionnement d'un radiateur électrique permet de déconstruire les arguments marketing. Ainsi, le radiateur électrique constitue un excellent support pédagogique pour initier les lycéens aux bases de la thermodynamique. À première vue, la conception d'un thermostat électronique pour radiateur semble simple à programmer. Cependant, cet article démontre le contraire : trois régulations sont nécessaires (température maximale, température de l'air et mode hors gel), ainsi qu'un filtrage précis des mesures de température pour assurer une stabilité optimale. La précision du contrôle thermique dépend du capteur et du convertisseur analogique-numérique du microcontrôleur. Par ailleurs, la programmation diffère selon le type de radiateur (convecteur, sèche-serviettes, panneaux rayonnants). Il est donc indispensable d'identifier les modèles thermiques et d'évaluer l'impact du rayonnement thermique sur la mesure de la température ambiante.

Malheureusement, lors de l'achat d'un appareil, les consommateurs ne prennent généralement pas en compte les problématiques de réparabilité. Leurs critères de choix sont souvent hiérarchisés de la manière suivante : en premier lieu, le prix, directement lié au pouvoir d'achat, puis la facilité d'installation, le type de radiateur pour une bonne diffusion de la chaleur, la confiance envers la marque, le design, l'entretien, la garantie et, enfin, le retour sur investissement comparé à d'autres types de radiateurs. La consommation énergétique, quant à elle, ne peut être connue à l'avance, car elle dépend des caractéristiques de la pièce et de son niveau d'isolation.

Concernant la facilité d'installation, chaque fabricant propose des fixations différentes. Une normalisation de ces systèmes simplifierait pourtant le remplacement des radiateurs par les consommateurs.

Enfin, un radiateur ne se remplace pas uniquement en cas de panne. L'évolution du marché et l'émergence de solutions plus performantes, comme les pompes à chaleur offrant une efficacité énergétique trois fois supérieure, entraînent progressivement le remplacement des convecteurs. De plus, le vieillissement esthétique, notamment l'altération des peintures des tôleries, incite souvent au changement avant même qu'une obsolescence électrique ne survienne. Pourtant, un simple nettoyage

à l'air comprimé suffit à l'entretien sans nécessiter de démontage. En revanche, repeindre un radiateur reste une opération complexe.

Pour finir, est-ce qu'un radiateur open source et facilement réparable se vendrait mieux qu'un radiateur avec des cartes propriétaire ? Est-ce que l'éducation fournit une base technique pour pouvoir réparer des choses donc pour minimiser les ressources de matières ?

10 - Bibliographies

- [1]. <http://www.michelterrier.fr/radiocol/detail2003/thermostat.htm>
- [2]. « Control heater automatic open source (régulation hystérésis de température radiateur) réparable, simulation »
<https://forum.arduino.cc/t/control-heater-automatic-open-source-regulation-hysteresis-de-temperature-radiateur-reparable-simulation/1337482>
- [3]. https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89%C3%A9ment_chauffant
- [4]. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-logement-2022/29-consommation-energie>
<https://www.quelleenergie.fr/magazine/chauffage-energie-electricite-gaz-bois-fioul>
- [5]. <https://www.captronic.fr/docrestreint.api/1290/10ee0ba779c1aa78bbb94aa91d0a03c71ac544a7/pdf/FIABILITE-26-04-2012-B.pdf>
- [6]. <https://aldservice.com/Free-MTBF-Calculator.html>
- [7]. Norme convecteur électrique
<https://u.dianyuan.com/bbs/u/34/1129625964.pdf>
- [8]. https://en.wikipedia.org/wiki/Zero_crossing
- [9]. <https://www.radiateur-electrique.org/convection-radiation.php>
- [10]. <https://www.alldatasheet.fr/html-pdf/224153/MELEXIS/MLX90614/295/1/MLX90614.html>
- [11]. Filtrage numérique (traitement du signal)
<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/pedagogiques/15866/15866-la-revue-3ei-n-103-janvier-2021-ensps.pdf>
<https://forum.arduino.cc/t/filtre-numerique-rii-rif-digital-filter-fft-atmega328-esp32/640606>
<https://www.f-legrand.fr/scidoc/docmml/sciphys/arduino/filtrage2/filtrage2.html>
- [12]. https://en.wikipedia.org/wiki/Insulation_system
- [13]. Indice de réparabilité et durabilité
<https://www.economie.gouv.fr/particuliers/tout-savoir-indice-reparabilite>
<https://www.indicereparabilite.fr/>
- [14]. <https://www.quechoisir.org/comparatif-radiateurs-electriques-n84223/top/>
- [15]. SAV constructeur
<https://www.noirot.fr/fr/categorie-sav/radiateurs-electriques#>
- [16]. <https://fr.ifixit.com/reparabilite>
- [17]. <https://librairie.ademe.fr/economie-circulaire-et-dechets/5654-retour-d-experience-de-la-mise-en-oeuvre-de-l-indice-de-reparabilite.html>
<https://librairie.ademe.fr/ged/6886/fiche-reparation-garanties-faire-durer-objets.pdf>

[18]. <https://www.heatershop.co.uk/what-fuzzy-logic>
<https://www.mathworks.com/help/fuzzy/fuzzy-logic-control-for-house-heating-system.html>