

Réalisation d'un BANC de TEST de vêtement : plaque thermoélectrique (Résistance et conductivité thermique de matériaux)

Arnaud. Sivert, Abdel.Faqir I.U.T de l'Aisne Département Génie Electrique SOISSONS

1 Introduction modèle thermique et caractéristique vêtement	page 2
2. Norme sur les vêtements isolateurs et respirabilité	page 3
3. Confort thermique et déperdition humaine	page 3
4 Rappel modèle thermodynamique	page 4
5 Banc de Mesure de la conduction thermique	page 5
51 Commande et Modélisation thermique plaque chauffante	page 6
52 Modélisation thermique de matière	page 6
53 Mesure de l'isolation d'un carton ondulé	page 7
54 Mesure pour modéliser un polaire en polyester	page 9
55 Mesure pour modéliser une veste en polyester	page 10
56 Test pour modéliser une veste en duvet de canard	page 10
57 Bilan de température de confort de différentes vestes	page 10
6 Commande et Modélisation plaque froide thermoélectrique	page 11
7 Test d'hygrométrie et température en temps réel en fonction de l'effort	page 15
8 Conclusions	page 15
9 Bibliographie	page 16
10 Annexes	page 16

Résumé :

Pour faciliter la compréhension des principes de la thermodynamique et des enjeux liés à l'isolation des bâtiments auprès des étudiants, il s'avère pertinent d'établir une analogie avec le transfert thermique chez l'homme et l'isolation assurée par les vêtements.

Les essais effectués sur les vêtements permettent d'évaluer leur conductivité thermique, offrant ainsi aux individus une compréhension de base des pertes de chaleur du corps. Ces expériences ont non seulement suscité l'intérêt des étudiants mais ont également stimulé une émulation entre eux dans ce domaine scientifique.

En outre, ces évaluations contribuent à développer une culture des matériaux et des textiles, favorisant ainsi des choix de consommation éclairés. En effet, bien que les étiquettes fournissent des informations sur les normes et les certifications, elles ne précisent pas la résistance thermique. Cependant, les caractéristiques de confort thermo-physiologique sont étudiées pour tous les vêtements dits "techniques", afin de mettre en évidence leurs capacités et de les améliorer [1, 2].

Peut-on vulgariser cette culture scientifique des textiles ? En effet, la connaissance des différents tissages mérite d'être approfondie pour une meilleure protection individuelle et une réduction de l'impact environnemental, s'inscrivant ainsi dans la responsabilité sociétale des entreprises du secteur textile [6].

Cet article abordera plusieurs questions importantes, notamment :

- Quel est le confort thermique et la résistance des matériaux pour l'homme ?
- Quels sont les ordres de grandeur de la conductivité thermique des textiles ?
- Comment mettre en place un dispositif de mesure pour évaluer la résistance et la conductivité thermique d'un matériau ?
- Quelle est la puissance nécessaire pour obtenir un flux thermique chaud et froid adéquat lors des mesures ?
- Comment utiliser efficacement un module thermoélectrique pour déterminer son modèle et ses performances ?
- Enfin, est-il complexe de mesurer les différentes couches thermiques, ainsi que la respirabilité et l'imperméabilité d'un vêtement ?

1. Introduction

Chaque année, un Français achète en moyenne environ 9 kg de vêtements. Ce chiffre est en constante augmentation, alimenté par la prolifération des enseignes de "**fast fashion**" qui proposent jusqu'à vingt collections différentes par an, selon les marques. Bien que les prix de ces collections soient attrayants, la qualité laisse souvent à désirer.

Parallèlement, l'industrie textile exerce un impact significatif sur l'environnement, et les conditions sociales et environnementales de fabrication sont souvent précaires. De plus, certaines matières utilisées dans nos vêtements peuvent présenter des risques pour la santé, malgré les interdictions, elles se retrouvent sur le marché.

Dans un contexte où l'utilisation de modes de déplacement doux et les randonnées tout au long de l'année sont de plus en plus courantes, il est essentiel de disposer de vêtements adaptés à toutes les saisons. Ainsi, les vêtements techniques à faible masse et volume sont indispensables, offrant une résistance thermique élevée, une bonne évaporation, une imperméabilisation efficace, une résistance à la déchirure et aux mouvements, le tout assorti d'une facilité d'entretien.

Il convient de noter que les êtres humains utilisent souvent plusieurs couches de vêtements pour s'adapter aux fluctuations des températures journalières quotidiennes.

Aujourd'hui, la notation et l'évaluation des produits sont de plus en plus répandues, qu'il s'agisse de l'étiquette énergie, de l'indice de réparabilité, du Nutri-Score, de l'éco-score ou encore de l'étiquette pneumatique. Dans ce contexte, faut-il également fournir des informations techniques sur nos vêtements ?

Il existe plusieurs moyens de mesurer la respirabilité des textiles, dont le coefficient de Résistance Évaporatoire Thermique (R.E.T.), inversé car il représente en réalité une résistance. Un R.E.T. inférieur à 6 indique une matière extrêmement respirante, avec une capacité de 30 kg/m²/24 h. Pour un R.E.T. compris entre 6 et 12, la matière est considérée comme très respirante, adaptée à un effort modéré, avec une capacité supérieure à 10 kg/m²/24 h. Entre 12 et 20, le tissu est moyennement respirant et peu agréable lors d'un effort moyen. Au-delà de 20, le tissu est peu respirant.

L'imperméabilité est évaluée à l'aide d'une colonne d'eau en mm, mesurée en "Schmerber", qui applique une pression de 0,1 mbar. Par exemple, un vêtement avec une valeur de 10 000 Schmerber résiste à une colonne d'eau de 10 mètres, exerçant une pression totale de 1 bar, en ajoutant la pression atmosphérique de 1 bar. En Pratique, 1 litre d'eau est utilisé sur 10 cm de rayon de textile, augmentant la pression jusqu'à ce que l'eau le traverse.

La résistance thermique devrait être indiquée pour tous les matériaux, de même que leur empreinte écologique. En effet, sous le même terme "ouate", le matériau peut être du polyester ou naturel, avec des fibres étirées différemment. En ce qui concerne l'isolation thermique, une unité anglophone spécialisée, le "clo", est utilisée pour mesurer la résistance thermique surfacique, correspondant à une valeur de 0,155 m²°CW⁻¹. Ainsi, plus le nombre de "clo" est élevé, meilleure est l'isolation thermique du vêtement.

Cet article démontrera qu'il est possible de mesurer facilement l'isolation des vêtements. Cependant, existe-t-il des normes obligatoires pour l'affichage des caractéristiques thermiques des vêtements, que ce soit dans un environnement domestique ou professionnel exposé au froid ?

2. Norme sur les vêtements isolateurs et respirabilité

En matière domestique, les normes sont absentes, mais certaines entreprises peuvent être certifiées selon les standards ISO 9920, ISO 11092, HQE, ou bénéficier de labels. Cependant, ces références sont souvent peu parlantes pour les consommateurs et les distributeurs lors de leurs décisions d'achat. En effet, les normes et certifications sont payantes et manquent de transparence.

<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9920:ed-2:v1:fr:fig:1>

<https://www.hge.guidenr.fr/cible-8-hge/confort-thermique-bilan-thermique.php>

Par exemple, pour les vêtements de travail, la norme EN-14058 est applicable, mais les informations fournies ne précisent pas les températures minimales d'utilisation.

<https://www.dmd-france.com/fr/content/24-en-14058>

En revanche, pour les sacs de couchage et les duvets, le marquage obligatoire selon la norme EN 23537 de 2016 est indispensable, comme illustré dans la figure suivante.

<https://rando-inside.com/comprendre-la-temperature-confort-dun-sac-de-couchage>



fig 1. Marquage sur un sac de couchage EN13357

Si les températures de confort et de limite fournissent des informations concrètes, celles relatives à la température extrême ne sont pas véritablement exploitables, car elles dépendent des pertes de chaleur corporelle qui sont variables d'une personne à l'autre. **Mais quelle est donc la température de confort humaine et son niveau de perte de chaleur ?**

3. Confort thermique et déperdition humaine

La déperdition du flux thermique d'un humain au repos est d'environ 60W/m² avec une surface de 1.7m² pour un adulte donc environ 100W au repos. La thermogénèse est la production de chaleur due aux activités métaboliques des organes et des muscles. La thermolyse représente les processus de dissipation de l'énergie thermique provenant de l'organisme vers le milieu extérieur avec la répartition suivante :

	ml/h	W.h/jour	%	Power (W)
respiration	13 à 30	300	12%	12,5
évaporation surface tronc		200	8%	8,3
évaporation cutanée	33 à 1000	400	16%	16,7
conduction cutanée		1600	64%	66,7

Le rendement mécanique d'un humain est environ de 25%. Pour un adulte, lors d'un effort moyen de plusieurs heures consécutives (pédalage en vélo à 27km/h), la puissance utile mécanique qu'il peut délivrer est de 100W avec un battement cardiaque passant de 55 à 115. Par conséquent, la déperdition pendant cet effort est de 300W. La couche de vêtement pendant cet effort devra être bien plus faible sans effort qui est de 100W. Environ 50% de cette déperdition est dans le tronc qui a une surface frontale de 0.5m², les textiles doivent minimiser les déperditions tout en évacuant la transpiration car l'eau est un bon conducteur de chaleur et l'isolation ne sera pas assurée. De plus, le vêtement doit être imperméable à la pluie et couper le vent.

La température de l'équilibre thermique du corps est d'environ de 31°C [3], donc la résistance thermique en fonction de la température ambiante correspondra à l'équation suivante :

$$R_{TH} \left(\frac{^{\circ}C}{W} \right) \cong \frac{31 - T_{ambiant}}{P_{humain}(W)} \quad (1)$$

Avec les déperditions de la puissance humaine limitée, plus la température ambiante sera faible et plus la résistance thermique R_{TH} devra être grande avec des matériaux fortement isolant.

Quelle est donc la résistance thermique nécessaire pour maintenir un niveau de confort et limiter la perte de chaleur ?

La température de la peau au niveau du tronc se situe généralement entre 31 et 33°C. Lorsqu'elle descend en dessous de 31°C, le corps ressent le froid, nécessitant l'ajout d'une couche de vêtement. En revanche, au-delà de 34°C, une couche peut être retirée. De plus, en cas de froid, l'organisme réagit en produisant une hormone vasoconstrictrice, resserrant partiellement les vaisseaux sanguins des extrémités (mains, pieds, nez, oreilles), les exposant ainsi au froid. Ce mécanisme vise à concentrer la chaleur au centre du corps pour protéger les organes vitaux, notamment le cerveau. Cependant, les émotions peuvent également influencer la température des différentes zones corporelles, nécessitant ainsi des ajustements de la résistance thermique des vêtements en fonction de la température ambiante.

Mais comment la résistance thermique des vêtements est-elle liée à leur conductivité thermique ?

4. Rappel modélisation thermodynamique

Étant donné que la chaleur se propage dans les trois dimensions par conduction, convection et rayonnement, mesurer le flux thermique surfacique (exprimé en Watt/m²) n'est pas une tâche aisée. De plus, les appareils de mesure de ce flux, tels que les fluxmètres, ne sont disponibles que depuis quelques années [7, 8, 9] et restent relativement coûteux à ce jour (environ 500€). La relation entre la température et le flux thermique, avec la résistance thermique surfacique RS_{TH} , peut être exprimée par l'équation suivante :

$$\Delta T = T_{interne} - T_{externe} = RS_{TH} \left(^\circ C \cdot \frac{m^2}{W} \right) \cdot \phi \left(\frac{W}{m^2} \right) = RS_{TH} \cdot \frac{P(W)}{Surface(m^2)} \quad (2)$$

Pour avoir un transfert de chaleur unidirectionnel, une plaque chauffante faible épaisseur sera utilisée.

La résistance thermique surfacique correspond à l'équation suivante ou λ (W/°C.m) est la conduction thermique, e l'épaisseur (m) du matériau et h le coefficient de convection de l'air (W/°C.m²).

$$RS_{TH} \left(m^2 \cdot \frac{^\circ C}{W} \right) = \frac{1}{h_A} + \sum \frac{e_{epaisseur}}{\lambda} + \frac{1}{h_B} \quad (3)$$

L'ordre de grandeur du coefficient de la convection horizontale h_A à 0°C correspond à 10 W/°C.m². Ce coefficient est très proche de celle de la position verticale qui est de 11. Mais, la valeur du coefficient de convection change légèrement lorsque la différence de température devient plus importante que l'équation suivante :

$$\Delta T = T_A - T_{ambient} > 75^\circ C \quad \text{http://www.ivaldi.fr/calcultherm.html}$$

Mais cet écart de température ne sera pas dépassé pour des vêtements.

Par contre, la vitesse du vent V (m/s) n'est pas négligeable et le coefficient de la convection de l'air augmente en fonction de l'équation suivante :

$$h(V) = 10 - V + 10 V^{1/2} \quad (4)$$

Donc à 10m/s correspondant à 36km/h, le coefficient de convection triple comme on peut l'observer sur la figure suivante. Un simple ventilateur ou la vitesse varie en fonction de la tension permet de faire un convection forcée mais il faut un anémomètre pour mesurer la vitesse de l'air sur le textile.

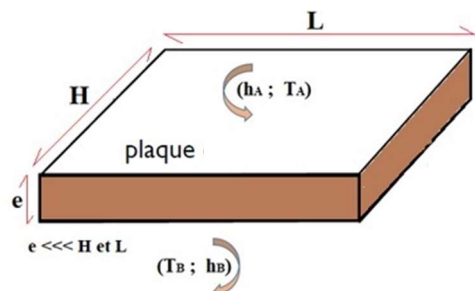


fig 2. Résistance thermique d'une plaque

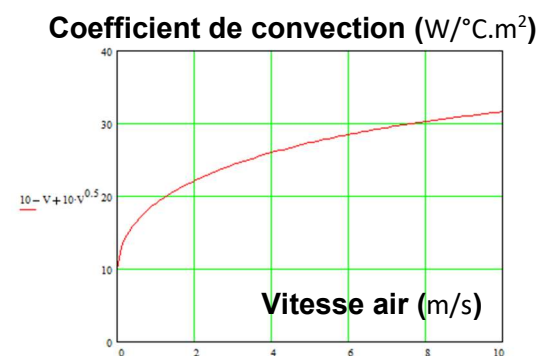


fig 3. Évolution du coefficient de l'air en fonction de la vitesse du vent (ou convection forcée)

Les ordres de grandeurs de la conduction thermique de différents textiles sont représentés sur la figure suivante mais aussi celui de la graisse du corps qui protège du froid les organes intérieurs ainsi que l'eau pour la transpiration.

La conduction thermique varie légèrement en fonction de la température d'où les températures de tests qui sont indiquées parfois.

Un textile est un bon isolant thermique du fait qu'il emprisonne entre 60% et de 80% d'air dans son propre volume. Évidemment, la conduction va changer en fonction de la teneur en transpiration absorbée par le textile.

Chaque textile avec le même matériau peut être travaillé différemment pour piéger l'air et n'aura pas la même conduction thermique donc les valeurs de la figure 4 sont des ordres de grandeurs.

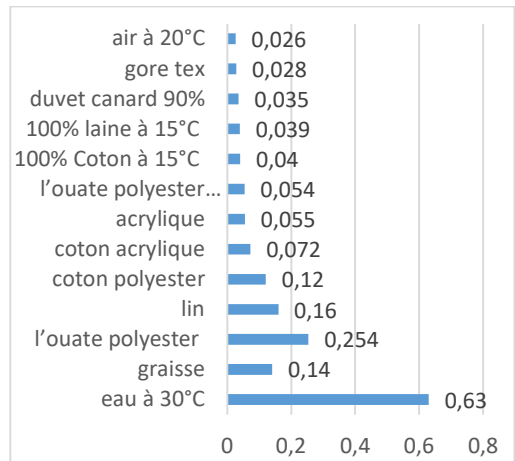


fig 4. Ordre de grandeur de conduction thermique de différents textiles dans la littérature

De plus, par exemple une chaussette va être constituée de plusieurs matières avec différents tissages pour épouser correctement le pied et donc la connaissance de la conductivité thermique de différents textiles ne permet pas de définir l'isolation globale du vêtement. Donc, comment réaliser un banc de mesure pour identifier la résistance thermique de matière ou de vêtement ?

5. Banc de Mesure de conduction thermique

Il y a de nombreuses méthodes pour mesurer la conductivité thermique d'un tissu ou d'un vêtement qui demande plus ou moins de matériel [4, 5].

Méthode avec une plaque chaude seulement et 2 couches de matériaux :

Pour un vêtement, le plus simple est d'utiliser une plaque chaude intérieure qui remplace la déperdition thermique humaine et de mesurer la température extérieure.

Il est facile de mesurer la température de la plaque chaude avec un thermocouple ou un petit capteur. Par contre, la température du tissu extérieur doit être mesurée avec un thermomètre infrarouge ou une caméra thermique car la conduction est faible entre le textile et le capteur.

Mais comment modéliser thermiquement une plaque chauffante ?

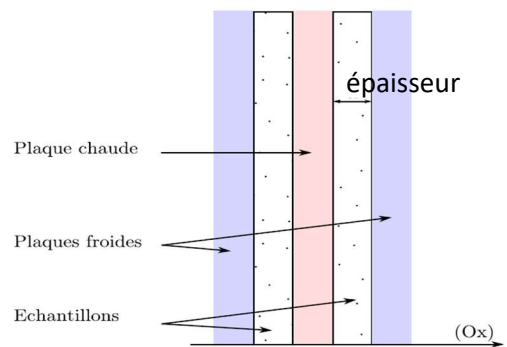


fig 5. Méthode « sandwich » la plaque chaude et plaques froides

51 Commande et Modélisation thermique plaque chauffante

Les fluxmètres pour mesurer le flux surfacique ne sont pas bon marché. Par contre, il est facile de connaître la puissance thermique d'une plaque chauffante ou d'un « film résistant » électrique qui a une faible épaisseur par rapport à sa surface comme sur la figure 2.

En effet, les films résistants de (15*10*0.3cm) sont courant sur le marché mais toutes les surfaces possibles sont disponibles. Il est aussi très facile de réaliser avec un film résistant de la surface désirée avec du fil nickel-chrome 80/20% avec par exemple du 25SWG (Standard Wire Gauge) qui a une résistance linéique de 11.5Ω/m pour un diamètre 0.35mm et pouvant supporter un courant de 10A autour d'une plaque d'époxy et recouvert de silicone pouvant supporter 600°C. Les films résistants ayant une faible épaisseur ont une inertie thermique faible permettant d'atteindre le régime établi température en quelques minutes.

En négligeant la déperdition de l'épaisseur, la puissance thermique de la convection ou de la conduction correspondra à la puissance électrique abordée correspondant à l'équation suivante :

$$P(\text{Watt})=U(\text{Volt}) \cdot I(\text{Ampère})=R(\text{ohm}) \cdot I^2=\Delta T \cdot S_{\text{surface}} (h_A + h_B) = \Delta T \cdot S_{\text{surface}} (\lambda/\text{épaisseur}) \cdot \quad (5)$$

Pour un souci de sécurité contre l'électrisation, la tension approximative du film résistant sera en très basse tension autour de 12V DC. Par conséquent, la puissance sera facilement réglable grâce à l'utilisation d'une alimentation stabilisée variable de 24Watt.

Exemple avec un film résistant de 36Ω de surface de 16x4 cm avec une épaisseur 0.5cm, positionné à l'horizontal donne les valeurs mesures pour déterminées les coefficients h_A et h_B suivantes **Table 1**

T Amb (°C)	tension (V)	courant (A)	power (W)	T dessus (°C)	T dessous (°C)	hA (W/°C.m2)	hB (W/°C.m2)	RTHsous (°C/W)	RTHsus (°C/W)	RTH plaque (°C/W)
20	8	0,22	1,76	32,7	31,7	10,83	11,75	13,3	14,4	0,6
20	10	0,28	2,80	40	37	10,94	12,87	12,1	14,3	1,1
20	12	0,34	4,08	50	46	10,63	12,26	12,7	14,7	1,0
20	30,4	0,84	25,54	108	100	22,67	24,94	6,3	6,9	0,3

On peut observer que l'on retrouve l'ordre de grandeur du coefficient de convection de l'air de la littérature. Mais dès que l'on atteint une valeur d'incrément de température de plus de 75°C, la valeur du coefficient de convection change beaucoup.

Le modèle thermique « électrique » équivalent à la plaque chauffante est représenté sur la figure suivante avec des résistances et des capacités thermiques. Avec l'inertie thermique ou la constante de temps qui peut être déterminée par l'équation suivante (6).

$$\tau(\text{seconde}) = C_{TH} \left(\frac{\text{Joule}}{^\circ\text{C}} \right) \cdot R_{TH} (^\circ\text{C}/\text{Watt})$$

Pour mesurer le régime établi de température, il faut attendre un temps supérieur à 3 fois cette constante de temps.

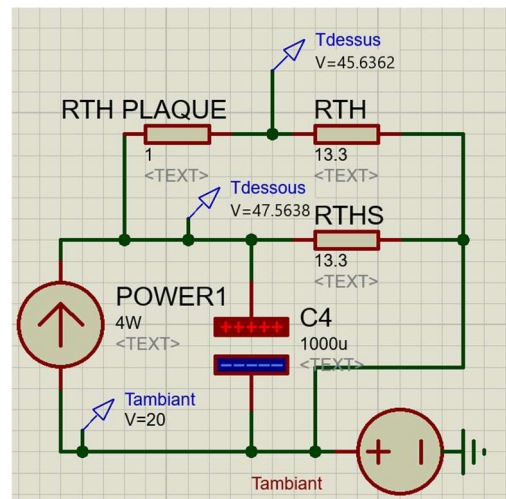


fig 6. Modèle thermique de la plaque chauffante simulé avec ISIS Proteus.

Cette capacité thermique dépend de la masse du film chauffant avec son isolation électrique qui permet d'avoir une flexibilité du film ou non. Cette capacité thermique peut être déterminée par la montée en température du film chauffant pour une réponse indicielle de puissance par l'équation (7) suivante

$$C_{TH} \left(\frac{\text{Joule}}{^{\circ}\text{C}} \right) = \frac{P(W) \cdot t}{\Delta T} = \frac{t[63\%T_{finale} + 36\%T_{initiale}]}{R_{TH}}$$

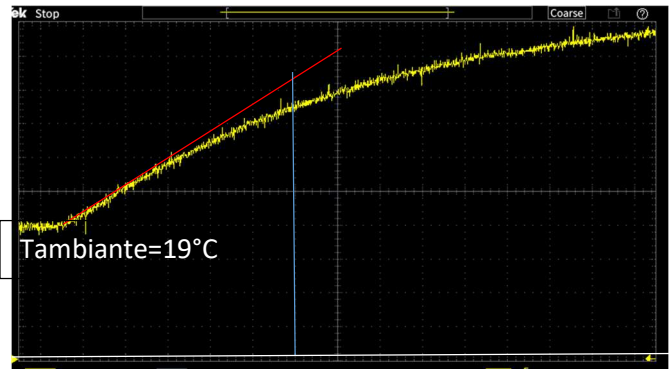


fig 7. Dynamique de la température d'un film chauffant base de temps 10s, 10mV/°C

D'ailleurs pour avoir le régime établi de température interne, un capteur de température analogique LM35 en boîtier TO220 sur le film chauffant a été utilisé avec un oscilloscope. La sensibilité de ce capteur est de 10mV/°C pour un prix de 0.1€. On peut observer que pour une puissance de 4W, la tension varie de 190mV (19°C) pour atteindre en régime établi 500mV (50°C) en 2,3 minutes.

$$C_{TH}(J/^{\circ}C) = \frac{60s}{(44^{\circ}C - 19^{\circ}C)/4W} = \frac{t[0.63 \cdot 50 - 19 \cdot 0.36]}{(12.7/13.4)} = \frac{60}{6.52^{\circ}C/W} = 9.2J/^{\circ}C$$

Attention, il faut visser le capteur de température au silicone avec de la graisse thermique sinon, la résistance de contact provoque une grosse erreur de mesure de température. Sinon, il faut utiliser un capteur PT1000 de quelques mm avec pont de Wheastone est un amplificateur. Mais la meilleure solution est de mettre un capteur infrarouge sur un microcontrôleur et d'utiliser sa sortie analogique pour observer la montée de température.

Cette mesure dynamique de la température permet de minimiser les erreurs de relevé de la température en régime établi pour la détermination des résistances thermiques de matière.

Mais, pour 30€ il est possible d'utiliser un thermomètre hygromètre numérique Bluetooth à batterie et récupérer les données via un « terminal » de réception sur un smartphone ou PC. Puis de récupérer les données en fichier .CSV pour tracer les courbes dynamiques avec Excel. L'hygromètre permet aussi de mesurer la respirabilité du vêtement en temps réel.

Mais l'objectif dans cet article est juste d'identifier la résistance et la conduction thermique de différentes matières. Maintenant que la modélisation de la plaque chauffante avec sa convection a été identifiée, quel est le modèle et les équations pour mesurer la conduction thermique de matière ?

52 Modélisation thermique de matière.

Les modèles équivalents thermiques peuvent être simulés par de nombreux logiciels dont ceux de l'électronique.

Le modèle thermique de la figure 5 de la plaque « échangeur » est représenté sur la figure suivante.

Un cadre en bois a dû être rajouté sur le vêtement extérieur autour de la plaque chaude sur le textile extérieur pour faire la même pression que le vêtement sur le corps humain. Dans un premier temps, les plaques froides ne seront pas utilisées donc correspondra à la température ambiante avec une convection naturelle appelée R_{air} .

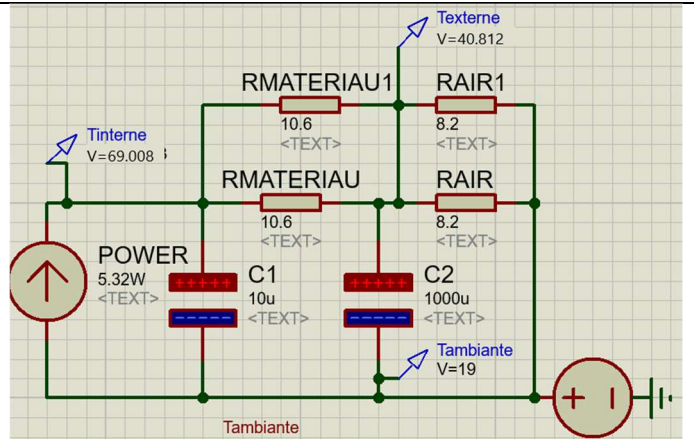


fig 8. Modèle thermique avec méthode plaque chaude pour carton ondulé de 5mm

Étant donné que le flux thermique est réparti équitablement sur les 2 surfaces (devant et derrière le film résistant chauffant) alors la conductivité thermique correspondra à l'équation suivante avec une puissance divisée par 2 :

$$P(W)/2 = (T_{interne\ chaud} - T_{externe\ materiaux}) \cdot (S_{surface} \cdot \lambda / \text{épaisseur}) \quad (7)$$

53 Mesure de l'isolation d'un carton ondulé

Un matériau isolant thermiquement facile à manipuler et qui permet d'augmenter les couches facilement est le carton ondulé avec une conductivité thermique entre 0.08 à 0.12 W/m.°C dans la littérature. Donc pour une épaisseur de 5mm, la résistance surfacique sera 0,063 m².°C/W et pour notre surface de plaque chauffante donne une résistance thermique de 9.7°C/W. **Table 2**

épaisseur	T ambiant (°C)	tension (V)	courant (A)	Power chauffe (W)	T interne (°C)	T externe (°C)	RTH matiere (°C/W)	λ (W/m°C)	RTH air (°C/W)
carton 5mm	19	12	0,34	4,08	55	35	9,8	0,080	7,8
	19	14	0,38	5,32	69	40,7	10,6	0,073	8,2
	19	16,5	0,44	7,26	91	51,7	10,8	0,072	9,0
2 cartons 5mm	19	12	0,34	4,08	59	29,2	14,6	0,107	5,0
	19	14	0,38	5,32	73	33	15	0,104	5,3

Pour la même puissance sans isolant (table1) et avec l'isolant (table 2), la température interne augmente car le carton isole et limite l'échange thermique vers l'air ambiant. L'ordre de grandeur de la conductivité thermique du carton est bien retrouvé en mesure. De plus, la légère variation de la conductivité thermique qui diminue en fonction de la température de chauffe est aussi identifiée. Lorsque l'épaisseur double alors théoriquement la résistance thermique aurait dû doubler avec une conductivité constante.

Mais en pratique l'augmentation de la résistance escomptée a augmenté mais pas doublé car la conductivité a légèrement augmenté et n'est pas constante. De plus, la résistance de l'air a légèrement diminué.

54 Mesure pour modéliser un polaire en polyester

Maintenant, un polaire (100g/m²) en polyester de 0.5mm d'épaisseur va être testé. Il est facile de plier le polaire en 2 pour mesurer l'évolution de la résistance thermique avec 2 épaisseurs. **Table 3**

épaisseur	Tambiant (°C)	tension (V)	courant (A)	power (W)	T interne (°C)	T externe (°C)	RTH matière (°C/W)	λ (W/m°C)	RTH air (°C/W)
polaire 100g/m ²	19	10	0,28	2,8	32	26,9	3,6	0,021	5,6
	19	12	0,34	4,08	41	33	3,9	0,020	6,9
2 polaire 100g/m ²	19	10	0,28	2,8	36	27,6	6,0	0,026	6,1
	19	12	0,34	4,08	44	32,2	5,8	0,027	6,5
	19	14	0,38	5,32	56	37,8	6,8	0,023	7,1

Avec le tableau précédent, on peut observer que la valeur de la conduction thermique mesurée est un peu inférieure à celle de la littérature. Lorsqu'on double l'épaisseur, la résistance thermique est bien doublée et la conduction thermique reste presque constante.

55 Mesure pour modéliser une veste en polyester

Maintenant, le teste d'une veste « 2 en 1 » de 8.75mm d'épaisseur en polyester multicouche va être effectué.

La photo a été prise avec une température ambiante de 5°C avec un sous vêtement et un polo.

La température corporelle est de 31°C et celle extérieure du tissu est de 10°C presque uniformément. Mais au niveau des coudes et sous les bras la température est de 23.2°C.

En effet pour ne pas gêner l'aisance des mouvements, ces endroits ne sont pas isolés. Pour avoir précisément, la température pour chaque partie du corps, la caméra doit évidemment s'approcher des zones à mesurer.



fig 9. Température caméra thermique

Ne connaissant pas le flux thermique des déperditions du corps qui est variable pour chaque humain, il n'est pas possible de connaître la résistance thermique du vêtement avec la caméra.

Par conséquent, les essais suivants ont été réalisés avec le film chauffant précédemment étudié (**table 4**)

T ambiant (°C)	tension (V)	courant (A)	power (W)	T interne (°C)	T externe (°C)	RTH matière (°C/W)	λ (W/m°C)	RTH air (°C/W)
20	8	0,22	1,76	40	26	15,9	0,086	11,4
20	10	0,28	2,8	59	30,6	20,3	0,067	7,4
10	10	0,28	2,8	52	21,7	21,6	0,063	8,4

On peut observer que la conduction thermique du multicouche est bien au-dessus de la valeur de la littérature du simple polyester 0.035 W/m°C. De plus, la conduction thermique varie légèrement en fonction de la température interne.

Sachant que le tronc d'un adulte est de 0.5m² de surface frontale, la résistance thermique de toute une veste correspondra à l'équation suivante

$$RTH_{veste} \left(\frac{°C}{W} \right) = RT_{THmatiere\ test} \cdot \frac{Surface\ test(m^2)}{Surface\ tronc(m^2)} = 20 \cdot \frac{0.0064}{0.5} = 0.26$$

Donc pour avoir une température du corps de 31°C avec une température ambiante de 5°C pour cette résistance thermique de 0.26°C/W, la déperdition humaine du tronc avec ce vêtement devra être de 100W. Par contre avec une température de -5°C, la déperdition devra passer à 140W toujours pour garder le corps à 31°C.

56 Test pour modéliser une veste en duvet de canard

Pour faire une comparaison, voilà le test d'une doudoune garnie de 90% de duvet de canard de 5mm d'épaisseur dans les mêmes conditions que précédemment. La température intérieure de la veste est de 30°C et celle extérieure du tissu au niveau de l'épaisseur du duvet est de 16°C. Mais au niveau des coutures ainsi qu'au niveau de la fermeture éclair qui n'est pas isolée, la température est de 22°C. mais sur l'ensemble de vêtement, cette surface peut être négligeable.

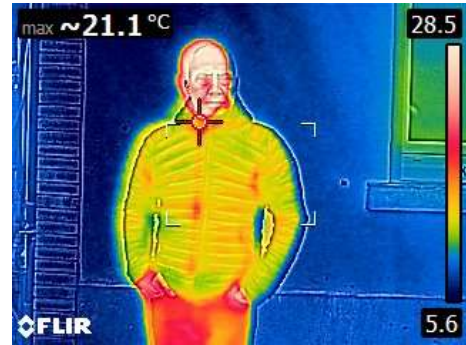


fig 10. Température caméra thermique

Table 5

T ambiante (°C)	Power chauffe (W)	T interne (°C)	T externe (°C)	RTH matière (°C/W)	λ (W/m°C)	RTH air (°C/W)
20	1,76	38	30	9,1	0,086	11,4
20	2,8	42	30,4	8,3	0,094	7,4
10	1,76	47	33	15,9	0,049	26,1
10	2,8	52	35	12,1	0,064	17,9

On peut observer que la conduction thermique du duvet de canard est bien en-dessous de la valeur de la littérature du duvet qui est de 0.035 W/m°C.

57 Bilan de température de confort de différentes vestes

Voici un bilan de différentes vestes testées avec un classement de température minimale de confort. Dans ce bilan, il faut prendre en compte le prix et la facilité d'entretien pour une acceptation d'achat de la clientèle. La résistance thermique est déterminée pour une surface d'un tronc de 0.5m². (Table 6)

Veste/ température mini de confort	Épaisseur (mm)	Masse (kg)	Volume plié (litre)	Conductivité Thermique (W/m°C)	résistance thermique (°C/W)	Prix/ facilité entretien
polyester -5°C à 10°C	8.75	1.1	5	0,067	0,26	
Duvet de canard 10°C à 15°C	5	0.32	1.5	0,064	0,16	
polyester 8°C à 15°C	5	0.75	2.3	0.06	0,17	
Softshell 14°C à 18°C	0.75	0.62	2.25	0.012	0,13	
Polaire 100g/m ² 15°C à 19°C	0.5	0.45	1.5	0.021	0,05	

Avec le tableau précédent, la résistance thermique de confort est représentée sur la figure suivante avec sa courbe de tendance linéaire correspondant à la littérature de l'équation (1). Mais cette résistance d'acceptabilité peut varier en fonction de la sensibilité au froid des personnes et de leurs déperditions thermiques

Quelle doit être l'épaisseur d'un vêtement en fonction de la conductivité thermique ?

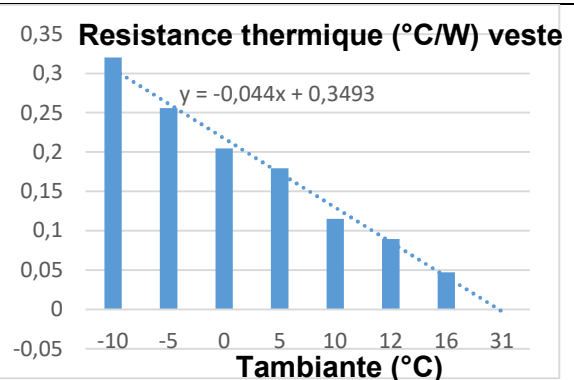


fig 11. Résistance thermique de confort en fonction de la température ambiante

À partir de l'équation (7 et 1), l'épaisseur d'un vêtement en fonction de sa conduction thermique correspond à l'équation suivante

$$epaisseur = (T_{interne\ chaud} - T_{amb}) \cdot surface \cdot (\lambda/P/2) - RTH_{air} \quad (8)$$

Exemple avec une température ambiante de 0°C, toujours pour une surface frontale du tronc de 0.5m², une déperdition thermique de 50W donc 100W/m², la résistance air sera de 0.2°C/W=1/ha.Surface, et avec une conduction thermique de matière 0.05 provoquant une résistance thermique de 1.04°C/W alors l'épaisseur devra être égale à l'équation suivante :

$$epaisseur = (31 - (0)) \cdot 0.5 \cdot (0.05/50/2) - 0.2 = 0.026m$$

Le modèle thermique de cette veste est représenté sur la figure suivante.

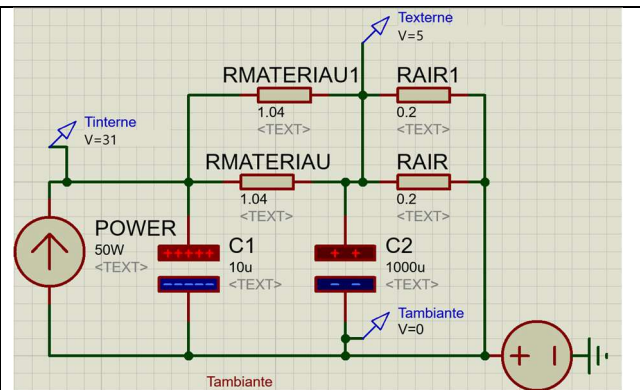


fig 12. Modèle thermique d'un tronc d'un adulte pour avoir un confort de 31°C en interne.

L'épaisseur d'un sous vêtement 0.5mm, ainsi que celui de la deuxième couche qui est de 1mm à 3 mm sont faibles par rapport à l'épaisseur d'une veste pour résister à des températures froides inférieures à 10°C. Étant donné que la conductivité thermique varie un peu en fonction de la température ambiante, des essais devraient être fait sur les textiles avec des températures froides 0°C ou de 5°C. Un frigo à compresseur réglable en température pourrait être utilisé ou une grande chambre froide avec le film résistant chauffant précédent.

Mais pourrait on placer 2 plaques froides extérieures par des modules thermoélectriques ?

6. Commande et Modélisation plaque froide thermoélectrique.

Les plaques thermoélectriques sont souvent surnommées « module Peltier » tel que le TEC12715 40x40x3mm 11€, 102 Watt de puissance froide, qui devrait pouvoir réaliser une température différentielle 75°C. Ces modules se retrouvent dans les glacières de voitures ou pour refroidir des composants électroniques donc ce sont des produits de masse bon marché.

Ces modules sont constitués de semi-conducteur qui sont traversés par un courant et permettent de transférer l'énergie thermique d'une de ces faces sur l'autre face.

Mais pour mesurer la conductivité thermique du matériau sans fluxmètre, il faut connaître la puissance de la surface froide. Cette puissance froide peut être connue mais un modèle thermique et électrique doit être identifié. Le dissipateur de la face chaude doit être bien dimensionné pour garder la température de cette face aux alentours de la température ambiante pour que la température de la face froide diminue. Sinon, c'est la face froide qui reste à la température ambiante et c'est la température de face chaude qui va augmenter.

Dans notre cas, il n'y a pas de dissipateur sur la face froide, donc l'inertie thermique est faible et il faut environ 15 secondes pour atteindre la température désirée.

Les courbes du constructeur donnent les figures suivantes pour connaître la puissance froide sachant que le module doit être commandé avec une source de courant (en réglant la limitation du courant d'alimentation pour modifier la puissance du froid).

Avec les figures suivantes, pour avoir un côté froid à 0°C sous une température ambiante de 20°C donc un ΔT=20°C, avec un courant limité à 4A va demander une tension de 5 V pour une puissance électrique de 20Watt de consommation. Avec la courbe de droite, la puissance de refroidissement pour ce courant de 4A avec l'incrément de température de 20°C désirée, donne une puissance froide 30 W.

Par conséquent, la puissance du côté chaud sera de 20W+30W mais la puissance que devra rejeter le dissipateur sera environ la puissance électrique de 20W comme le montre la figure 14.

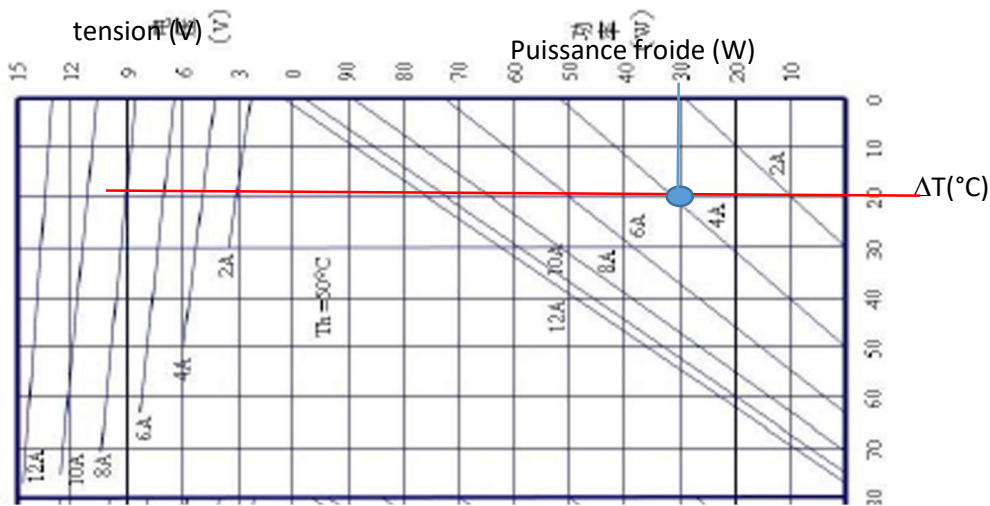


fig 13. Tension, courant, puissance électrique froid en fonction de l'incrément de température du module référencé TEC12715 ($R=0.75\Omega$, coolpower=102W, $\Delta T_{max}=75^\circ C$, $V_{max}=15V$, $I_{max}=12A$)

La détermination de la puissance froide à partir d'équations [11] est plus facile que la lecture des courbes. Mais, les coefficients du module sont rarement donnés par les fabricants. Par contre, il est possible d'identifier les coefficients du modèle à partir des valeurs max du module ainsi que des courbes précédentes [12].

Dans un premier temps, par simplification, on considéra la résistance du matériau à tester sera infini par rapport à la résistance propre du module et du dissipateur. Donc, la puissance dans le dissipateur correspond à la puissance absorbée électrique du module et correspond à l'équation suivante avec une résistance thermique de contact et du dissipateur de $0.8^\circ C/W$

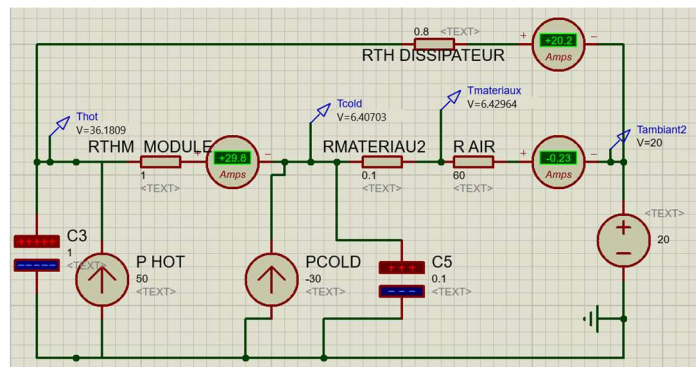


fig 14. Modèle d'un module thermoélectrique avec sa puissance froide et chaude.

$$T_{hot} = T_{amb} + P_{absorbée} \cdot RTH_{Dissip} \quad (9)$$

Avec, la puissance absorbée électrique correspondant à l'équation suivante

$$P_{absorbée}(I) = V(\text{Volt}) \cdot I(\text{Ampere}) = Sm \cdot \Delta T \cdot I + R(\text{ohm}) \cdot I^2 \quad (10)$$

Avec le coefficient d'effet Seebeck qui produit le transfert de chaleur et dont la valeur peut être déterminé à les équations suivantes via les courbes précédentes du constructeur

$$Sm (V/^\circ k) = \frac{V_{max}}{\Delta T_{Hot}} = \frac{15}{(75+271)} \approx \frac{P_{max}}{I \cdot (271+T_{cold})} = \frac{52W}{4A \cdot (271^\circ k+0^\circ)} = 0.047 \quad (11)$$

Avec R correspondant à la résistance électrique qui provoque une perte de chaleur interne du module en provoquant une diminution de puissance froide.

La température de la face froide correspond à l'équation suivante avec la résistance thermique RTHm entre la face froide et la face chaude du module. Cette résistance thermique s'oppose à l'effet voulu du transfert de chaleur d'où la diminution de la température froide. La puissance froide sera évidemment négative.

$$T_{cold} = T_{HOT} + P_{cold}(IA) \cdot RTH_m \quad (12)$$

En mélangeant les équations (9, 10, 12), la température froide en fonction du courant correspondra environ à l'équation simplifiée suivante avec le terme Seebeck qui produit le refroidissement, le terme RI^2 qui

correspond à la perte de puissance électrique. Cette équation est simplifiée à environ 5% d'erreur avec la vraie équation qui est trop grande pour être présentée dans cet article.

$$T_{cold}(I) \approx T_{amb} + \left(RTH_{Dissip} + \frac{RTH_m}{2} \right) R \cdot I^2 - 271 \cdot RTH_m \cdot Sm \cdot I \quad (13)$$

Plus le coefficient Seebeck est grand avec une résistance ohmique petite alors l'écart de la température froide par rapport à la température ambiante sera importante. De plus, avec un dissipateur thermique grand sur la face chaude donc avec une résistance thermique très faible alors la température froide pourra être plus importante. Sachant que la puissance froide et la puissance chaude correspondent aux équations suivantes

$$P_{cold}(I, T_{cold}) = -Sm \cdot I \cdot (T_{cold} + 271) + \frac{R}{2} \cdot I^2 \quad (14)$$

$$P_{hot}(I, T_{HOT}) = P_{absorbée} - P_{cold}(I, T_{cold}) = Sm \cdot \Delta T \cdot I + (Sm \cdot I \cdot (T_{cold} + 271) - \frac{R}{2} \cdot I^2) \quad (15)$$

À partir de la résistance thermique du dissipateur, l'évolution de la température froide et chaude en fonction du courant peut être tracé en théorie et d'en déduire la puissance froide, chaude et absorbée.

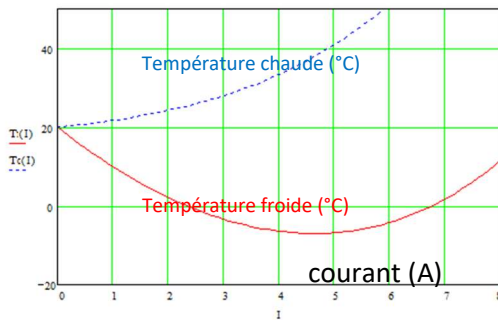


fig 15. Température froide et chaude du module théorique vs courant pour un dissipateur de 0.8°C/W avec un température ambiante de 20°C.

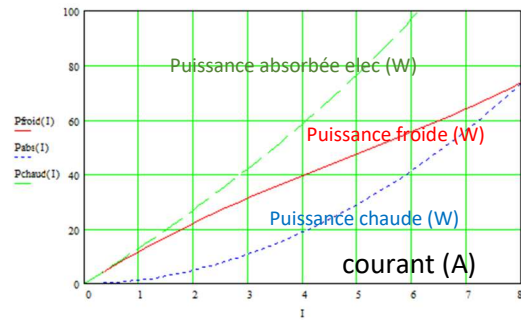


fig 16. Puissance froide, chaude et absorbée électrique du module en fonction du courant.

À cause des pertes dans la résistance ohmique du module et de la résistance thermique propre du module, quelle est la température froide minimum ?

Cette température minimum correspondra à l'équation suivante pour la valeur de courant dite optimale de la température froide.

$$T_{cold_{mini}}(°C) = T_{amb} - \frac{(271 \cdot Sm \cdot RTH_m)^2}{2 \cdot R \cdot (RTH_m + 2 \cdot RTH_{di})} \quad (16)$$

$$I_{T_{cold_{mini}}}(A) = \frac{271 \cdot Sm \cdot RTH_m}{R \cdot (RTH_m + 2 \cdot RTH_{di})} \quad (17)$$

Le tableau de mesure suivant donne la température froide du module en fonction de la commande de courant.

Les mesures permettent d'ajuster les coefficients du modèle thermo électrique et de voir les limites de fonctionnement du thermoélectrique en fonction de son choix et de son dissipateur.

Remarque : Il n'est pas facile de mesurer correctement la température du côté chaud du module car cette face est sur le refroidisseur.



fig 17. TEC12715 avec son dissipateur sous 4.8A et 6.4V avec refroidissement à eau et ventilateur alimenté en 15.9V et consommant 0.34A pour avoir une température froide de -2.1°C avec une température ambiante de 20°C

TEC 12715 mesure Tambiante=19°C table 7						Théorie					
courant (A)	tension (V)	Power Abs (W)	T cold (°C)	T hot (°C)	ΔT (°C)	Voltage (V)	T hot (°C)	T cold (°C)	Power cold (W)	RTHm °C/W	P hot (W)
0,5	0,6	0,3	16	19,2	3,2	0,64	19,2	13,5	-6,1	0,53	6,4
1	1,3	1,3	11,5	20	8,5	1,37	20,0	8,6	-11,7	0,73	13,0
2	2,5	5	5,4	22	16,6	2,72	23,0	0,8	-21,9	0,76	26,9
3	3,7	11,1	0	23	23	3,99	27,9	-4,4	-30,6	0,75	41,7
4	5	20	-2,7	25	27,7	5,20	35,0	-7,0	-38,4	0,72	58,4
5	6,7	33,5	-3	34	37	6,60	45,8	-7,0	-45,4	0,82	78,9
6	8,5	51	-1,3	43	44,3	7,91	59,8	-4,4	-51,9	0,85	102,9
7,8	11,6	90,48	7	70	63	10,52	91,4	6,8	-63,2	1,00	153,7

Bien que mesurer la température de la face chaude puisse être difficile, les erreurs sont minimales en ce qui concerne la température froide, ce qui rend l'estimation de la puissance froide relativement correcte. Cependant, il existe d'autres fluctuations qui ne correspondent pas à la théorie, telles que l'augmentation de la résistance thermique du module avec l'augmentation de la différence de l'incrément de température (ΔT). De plus, la résistance ohmique augmente de 0,75 à 1 Ω en fonction de l'augmentation de ΔT . Mais après avoir effectué ces mesures sur le module, il est possible de prendre en compte ces faibles variations dans le modèle afin d'identifier plus précisément la puissance froide.

Ainsi, si la puissance froide peut être déterminée avec peu d'erreur à partir du module thermoélectrique, la méthode du "sandwich" utilisant deux plaques froides, comme illustré dans la figure 5, peut être mise en œuvre pour mesurer la conductivité thermique en mesurant la température centrale du vêtement, même à une température ambiante de 20°C.

Cependant, une grande différence de température entre la température de la face froide et la température ambiante peut entraîner de la condensation sur cette face froide du thermoélectrique.

En effet, la condensation se produit lorsque la température de l'air environnant de la face froide est inférieure au point de rosée. Ce dernier peut être déterminé à partir du diagramme hygrométrique présenté dans la figure suivante. Par exemple, avec de l'air humide à 20°C et une humidité relative de 70%, la condensation commencera à se former à partir de 14°C. À une température de 20°C et une humidité relative de 50%, la condensation se produira à une température inférieure à 10°C.

Cependant, ce processus de condensation prend environ 10 minutes pour se manifester.

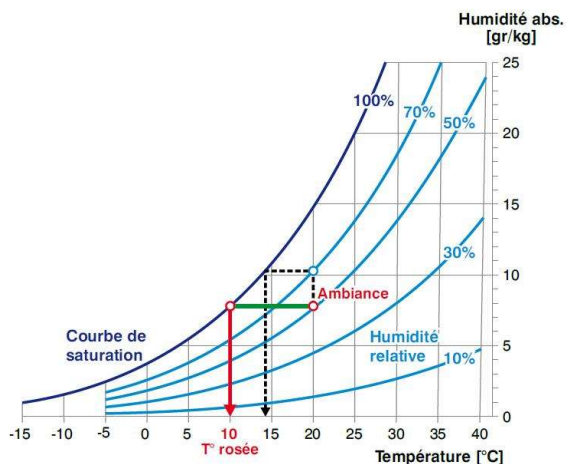


fig 18. Diagramme hygrométrique de l'air [13]

7. Test d'hygrométrie et température en temps réel en fonction de l'effort

Pour tester en temps réels, la température et l'hygrométrie d'une veste en fonction de l'effort, il est possible de mettre des capteurs sous la veste et de voir leurs évolutions. D'ailleurs, voici l'évolution de température et de l'hygrométrie en faisant du vélo à 30km/h.

De 12H30 à 13H, on passe de l'intérieur d'une maison à 20°C à l'extérieur avec une température de 10°C, sans trop d'effort. Puis de 13H à 14H, l'effort est modeste et l'hygrométrie augmente à partir de 50%. De 14h à 15h, l'effort est plus intense et les pertes de chaleurs humaines augmentent donc la température sous la veste augmente de plus, l'hygrométrie atteint 73%. De 15h45 à 16H30, l'effort s'arrête et la température diminue ainsi que l'hygrométrie. Puis à 16H30, l'effort recommence mais à 17h, la veste est entrouverte pour dissiper l'hygrométrie interne de la veste.

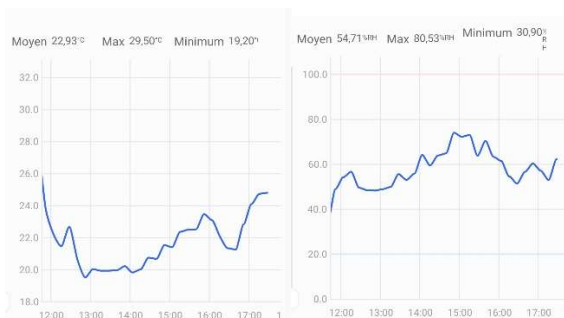


fig 20. Mesure de température et hygrométrie sous une veste peu respirante en temps réelle en fonction de l'heure.

Sans fluxmètre, ce test ne permet de donner de valeur sur la résistance thermique, ni sur la capacité d'évaporation d'un textile mais permet d'observer et ressentir le confort thermique et hygrométrique ou la personne va ouvrir ou retirer sa veste.

8. Conclusion

Cet article met en lumière la possibilité de rendre accessibles les connaissances en thermodynamique des matériaux avec des moyens modestes, ce qui devrait contribuer à les intégrer à la culture générale [14]. Comprendre les phénomènes thermiques à travers l'isolation du corps humain permet d'appréhender la thermodynamique avec des ordres de grandeur de puissance et d'acquérir une culture générale des phénomènes thermiques. L'accessibilité future des fluxmètres thermiques rendra les mesures encore plus simples.

Bien que la science des textiles soit complexe, couvrant des aspects tels que la respirabilité, le confort thermique, la facilité d'entretien et la résistance mécanique, il est possible de la rendre accessible à tous. En effet, la composition d'un vêtement ne se limite pas à son rembourrage et à la mesure de sa résistance thermique, mais englobe également sa résistance mécanique, évaluée à l'aide d'appareils tels que l'abrasimètre et des dynamomètres pour tester la résistance des coutures en fonction de la densité de tissage, ainsi que pour estimer sa durabilité.

Toutes ces informations techniques devraient être disponibles sur chaque vêtement, mais cela nécessite une compréhension approfondie des besoins des consommateurs.

Avec des indications techniques, les consommateurs seront-ils plus exigeants quant à la qualité et feront-ils des achats plus respectueux ?

Est-ce que l'État doit envisager l'obligation de ces indications techniques ?

Est-ce que l'État doit envisager d'instaurer un système de bonus-malus sur certains vêtements en fonction de leur impact sur l'environnement ?

https://www.francetvinfo.fr/culture/mode/mode-un-depute-lr-veut-mettre-en-place-un-malus-pour-la-fast-fashion_6362989.html

9. Bibliographie

- [1]. « Clothing Thermophysiological Comfort t: A Textile Science Perspective » revue textile 2023
<https://www.mdpi.com/2673-7248/3/4/24>
- [2]. « Propriétés de confort thermo-physiologique des vêtements avec différentes combinaisons de couches intérieures et extérieures » *Materials* 2021
<https://www.mdpi.com/1996-1944/14/22/6863>
- [3]. https://en.wikipedia.org/wiki/Clothing_insulation
https://fr.wikipedia.org/wiki/Isolation_vestimentaire
- [4]. 2022 <https://testextile.com/fr/r%C3%A9sistance-thermique-du-tissu-r%C3%A9sistance-%C3%A0-la-vapeur-d%27eau-et-transpiration-m%C3%A9thode-d%27essai-de-la-plaque-chauffante-prot%C3%A9g%C3%A9/>
- [5]. Sébastien Gauthier « Caractérisation thermique de la matière par la méthode 3 ω » thèse 2013
https://theses.hal.science/tel-00826953/file/thesis_gauthier_s.pdf
- [6]. Infographie impact sur la planete vetement ademe
<https://lc.cx/82OL8W>
<https://librairie.ademe.fr/consommer-autrement/3882-exposition-le-revers-de-mon-look-quels-impacts-ont-mes-vetements-sur-la-planete-.html>
https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2019/09/01/co2-eau-microplastique-la-mode-est-l-une-des-industries-les-plus-polluantes-du-monde_5505091_4355770.html
- [7]. <https://themacs-engineering.com/actualites/test-comparatif-de-lisolation-thermique-de-doudounes/>
- [8]. <https://www.eko-instruments.com/in/categories/products/heat-flux-sensors/mf-180>
- [9]. Thèse Fluxmètre thermique : conception, modélisation, réalisation et caractérisation. Mesures de températures et de densités de flux thermiques 2016
- [10]. https://www.youtube.com/watch?v=ZcL9Fwfov0k&ab_channel=Dickson%2Cinnovativetextilesforourworld
- [11]. https://fr.wikipedia.org/wiki/Refroidissement_thermo%C3%A9lectrique
- [12]. <https://thermalbook.wordpress.com/thermoelectric-cooler-performance-calculator/>
- [13]. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Hygrom%C3%A9trie>
- [14]. <https://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/caloduc.xml>

10. Annexes

Tableau 7 : Conduction thermique de différents textiles de la littérature

matériaux	λ conduction (W/m°C)	masse volumique (kg/m ³)	densité (g/m ²)
eau à 30°C	0,63	1000	
graisse	0,14	900	
l'ouate polyester	0,254	45	100
lin	0,16	400	
coton polyester	0,12		
coton acrylique	0,072		
acrylique	0,055		
l'ouate polyester polaire	0,054	90	200
100% Coton à 15°C	0,04	270	
100% laine à 15°C	0,039	200	
duvet canard 90%	0,035	30	
gore tex	0,022		
air à 20°C	0,026	1,2	

1. Mesure de modélisation thermique sur des chaussettes

2 tests de paires de chaussette de matières différentes ont été effectués. (Tableau 8)

chaussette	Épaisseur (mm)	Masse (kg) paire	Volume plié (litre)	résistance thermique (°C/W)	Conductivité Thermique (W/m°C)	Prix/ facilité entretien
head hiking-crew 40 %coton, 39 %polyester, 19 %polyamide	2.5	75g	0.3	4,6	0,086	4€/ facile
Salomon X ultra ankle 51 % polyamide, 47 % laine mérinos, 2 % élasthanne.	1	50g	0.14	3,9	0,040	6€/ moyen

On peut observer que ces 2 chaussettes ont le même équivalent thermique malgré l'épaisseur différente. De plus, les mérinos respirent et sèchent mieux car moins épaisse.

2. Tests de films résistants

Pour un film (12V 60Watt) de 15cm x 5cm avec une constante de temps de 150s (tableau 9)

film résistant (ohm)	T amb	tension (V)	courant (A)	power (W)	T dessus (°C)	hA (W/°C.m2)	RTHsus (°C/W)
2,31	19	1,5	0,65	0,98	29	6,50	20,5
2,35	19	2	0,85	1,70	32,6	8,33	16,0
2,50	19	2,5	1	2,50	39,6	8,09	16,5
2,52	19	3	1,19	3,57	43	9,92	13,4
2,53	19	6	2,37	14,22	95	12,47	10,7
2,56	19	12	4,68	56,16	250	16,21	8,2

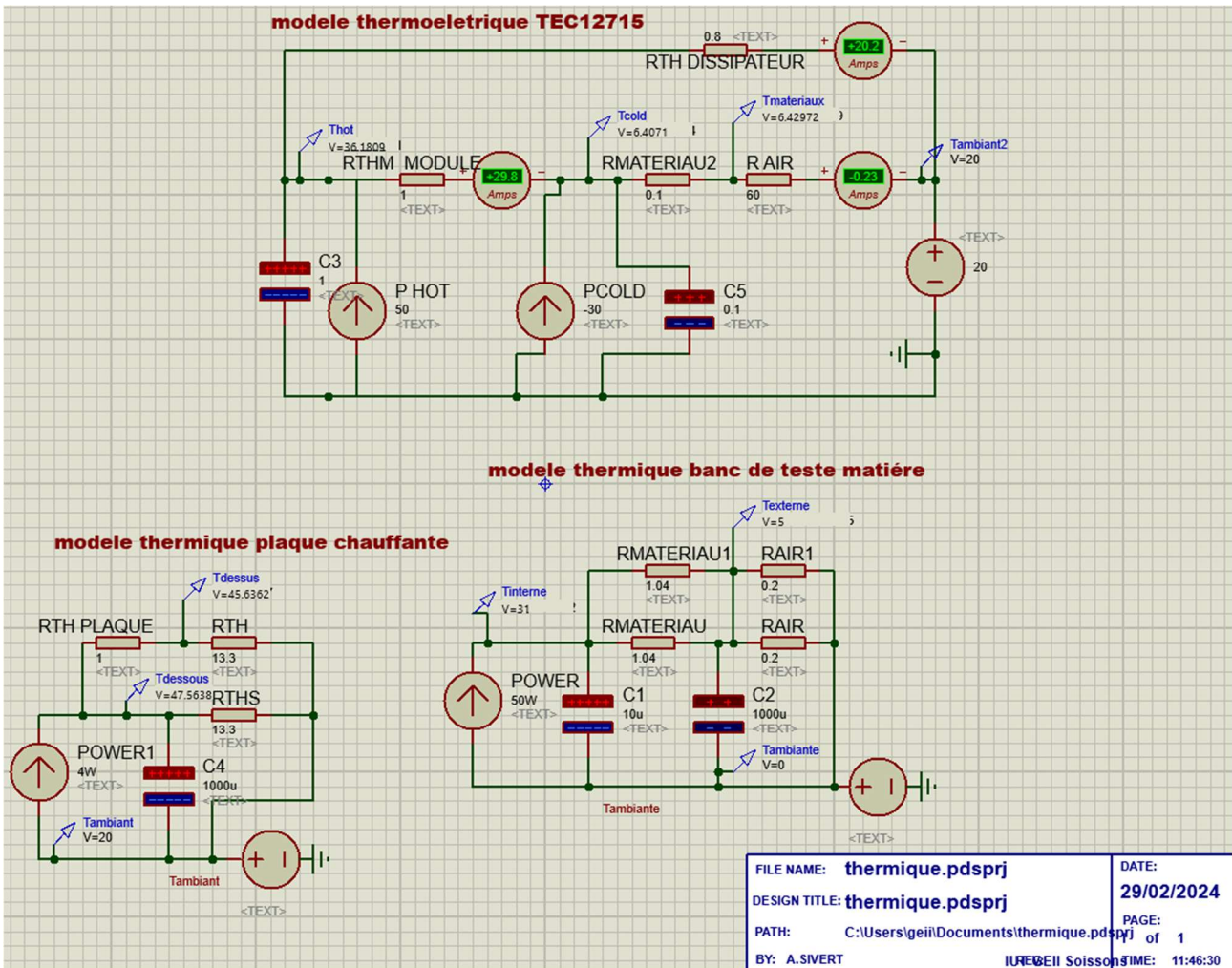


Mesure température film résistant 60W/12V



Mesure température film résistant 60W/12V

Modèles ISIS utilisés :



FILE NAME: thermique.pdsprj	DATE: 29/02/2024
DESIGN TITLE: thermique.pdsprj	PAGE: 1
PATH: C:\Users\geii\Documents\thermique.pdsprj	of 1
BY: A.SIVERT	IURE&II Soissons TIME: 11:46:30