Lombard
WEB SERVICES

Recherche des Nouvelles Formes de Chaleur

Thibaut LOMBARD

19 avril 2026

contact@lombard-web-services.com

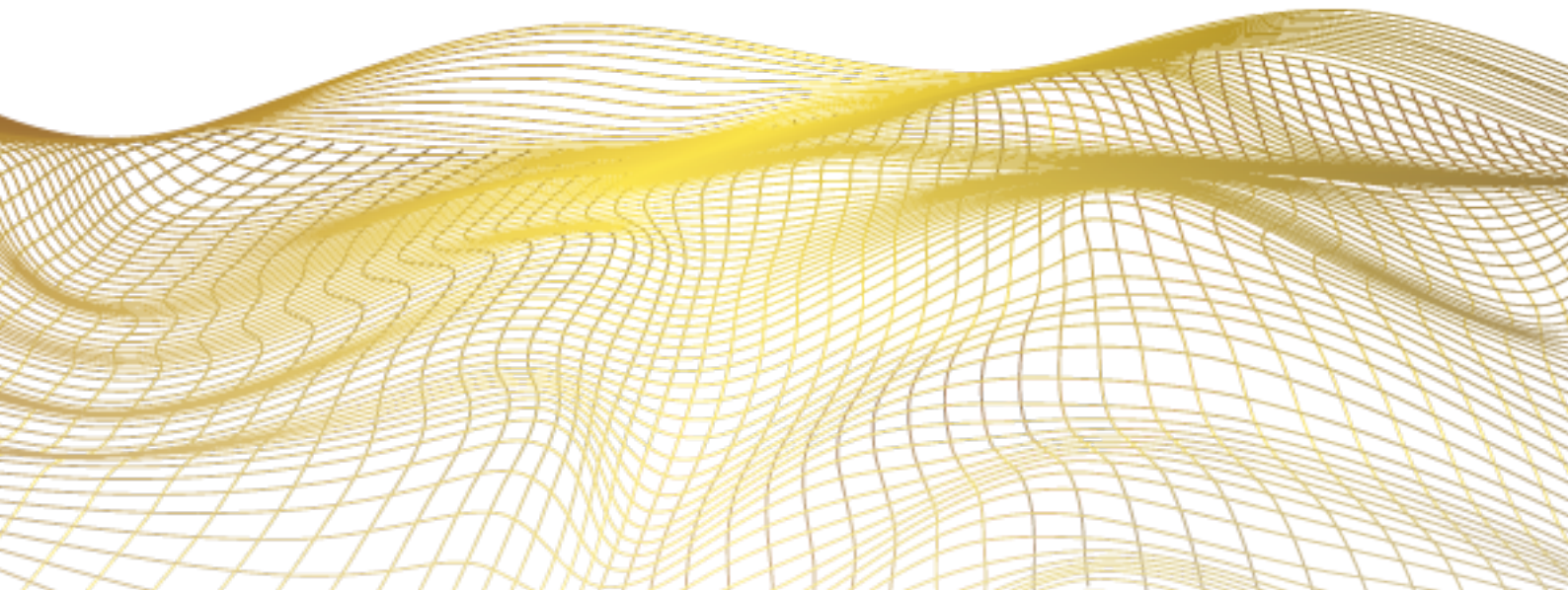


Table des matières

1 Introduction : La Thermochrose et les Pouvoirs Diathermanes **2**
- 1.1 Contexte historique . . . 2
- 1.2 Le problème de la conservation de l'énergie thermique . . . 2
- 1.3 Objectifs du document . . . 2

2 La Formule Fondamentale de Macedonio Melloni **3**
- 2.1 Énoncé de l'équation . . . 3
- 2.2 Décomposition détaillée des termes . . . 3
  - 2.2.1 Facteur d'étalonnage G . . . 3
  - 2.2.2 Gain de la thermopile $\frac{n\alpha SA}{R_{\text{th}}}$ . . . 3
  - 2.2.3 Flux thermique incident $\frac{\sigma T^4 A_{\text{source}}}{4\pi r^2}$ . . . 3
  - 2.2.4 Pouvoir diathermane $e^{-\tau}$ . . . 4
  - 2.2.5 Réponse du détecteur ε_{det} . . . 4

3 Du Produit Commutatif à l'Addition **5**
- 3.1 La propriété commutative de la multiplication . . . 5
- 3.2 La transformation logarithmique . . . 5
- 3.3 Simplification du terme de transmission . . . 5
- 3.4 Expression complète en échelle logarithmique . . . 5

4 Expression en Décibels (dB) **7**
- 4.1 Définition et intérêt de l'échelle logarithmique décimale . . . 7
- 4.2 Détail des contributions en décibels . . . 7
  - 4.2.1 Contribution de la distance . . . 7
  - 4.2.2 Contribution de la température . . . 7
  - 4.2.3 Contribution du pouvoir diathermane . . . 8

5 Visualisation de la Chaîne de Mesure **9**
- 5.1 Diagramme de flux complet . . . 9
- 5.2 Sensibilité spectrale de la thermopile . . . 9
- 5.3 Distribution des phénomènes en $1/r^2$ . . . 10
- 5.4 Comparaison des pouvoirs diathermanes . . . 10

6 Scénario Numérique : Source à 80 degrés C **12**
- 6.1 Paramètres du scénario de base . . . 12
- 6.2 Calcul pas à pas des contributions en dB . . . 12
- 6.3 Interprétation physique . . . 12
- 6.4 Vérification par le calcul direct . . . 12

7 Scénario Numérique : Source à 200 degrés C **14**
- 7.1 Paramètres du scénario modifié . . . 14
- 7.2 Calcul pas à pas des contributions en dB . . . 14
- 7.3 Analyse comparative . . . 14
- 7.4 Interprétation physique du scénario modifié . . . 14

8 Matrice des Méthodes Exploratoires **16**
8.1 Classification des instruments de Macedonio Melloni 16
8.2 Description des instruments 16
8.2.1 Thermoscope 16
8.2.2 Thermomultiplicateur 16
8.2.3 Thermactinometre 16
8.2.4 Oethrioscope 16

9 Applications Modernes : Thermographie Infrarouge **17**
9.1 La chaîne de mesure contemporaine 17
9.2 Expression en décibels pour la thermographie moderne 17
9.3 Exemple de correction en thermographie 17
9.4 Pouvoirs diathermanes des matériaux modernes 18

10 Synthèse et Conclusion **19**
10.1 Résumé des résultats 19
10.2 De Macedonio Melloni à la physique moderne 19

Résumé

Ce document présente une analyse approfondie de la formule de Macedonio Melloni sur la *Thermochrose* (1850) et son lien fondamental avec les pouvoirs diathermanes. Nous démontrons que la transformation du produit commutatif des facteurs physiques en addition via les logarithmes n'est pas une simple astuce mathématique, mais le reflet d'une invariance physique profonde. La chaîne de mesure complète est détaillée, depuis le flux thermique incident jusqu'au signal électrique, en passant par les mécanismes de réflexion, diffusion et absorption. Deux scénarios numériques concrets (80 degrés C et 200 degrés C) illustrent la méthodologie de calcul en décibels, et les applications modernes en thermographie infrarouge démontrent la pertinence contemporaine de ces principes historiques.

1 Introduction : La Thermochrose et les Pouvoirs Diathermanes

1.1 Contexte historique

Macedonio Melloni (1798–1854) est considéré comme l'un des pionniers de la thermographie infrarouge moderne. Ses travaux sur la *thermochrose* — littéralement la "coloration calorifique" — ont établi les fondements de la mesure quantitative du rayonnement thermique. À l'aide de sa thermopile, instrument sensible capable de détecter de infimes variations de température, Macedonio Melloni a pu quantifier les interactions entre la chaleur rayonnante et la matière.

Le concept central de ses recherches est le **pouvoir diathermane**, terme qu'il a forgé par analogie avec le pouvoir diaphane (transparence à la lumière visible). Un corps diathermane est un milieu qui laisse passer les rayons calorifiques, tandis qu'un corps adiathermane les bloque. Cette distinction est fondamentale pour comprendre la propagation de la chaleur à travers différents milieux.

1.2 Le problème de la conservation de l'énergie thermique

Lorsqu'un flux de chaleur incident frappe une surface, trois phénomènes principaux se produisent simultanément :

1. **Réflexion** : une fraction r de la chaleur est renvoyée vers la source.
2. **Diffusion** : une fraction d est dispersée dans toutes les directions.
3. **Absorption** : une fraction a est absorbée par le matériau.

Par conservation de l'énergie, la somme de ces trois fractions doit égaler l'unité :

$$\boxed{a + r + d = 1 \quad \Rightarrow \quad a = 1 - (r + d)} \tag{1}$$

Cette équation constitue le point de départ de notre analyse. Elle exprime que la chaleur absorbée est ce qui reste après avoir soustrait les fractions réfléchie et diffusée de la chaleur totale incidente.

1.3 Objectifs du document

Ce document répond aux questions suivantes :

- Comment la formule de Macedonio Melloni relie-t-elle quantitativement les pouvoirs diathermanes à la mesure du flux thermique ?
- Comment le produit commutatif des facteurs physiques se transforme-t-il en addition via les logarithmes ?
- Quelle est la signification physique de cette transformation ?
- Comment appliquer concrètement ces principes à des scénarios réels ?
- Quelles sont les applications modernes de cette formalisation ?

2 La Formule Fondamentale de Macedonio Melloni

2.1 Énoncé de l'équation

La formule synthétique de Macedonio Melloni relie le signal mesuré par la thermopile aux paramètres physiques du système. Elle s'écrit :

$$\boxed{\theta_{\text{rheo}} = G \times \frac{n\alpha SA}{R_{\text{th}}} \times \frac{\sigma T^4 A_{\text{source}}}{4\pi r^2} \times e^{-\tau} \times \varepsilon_{\text{det}}} \tag{2}$$

Cette équation est un **produit commutatif** de cinq facteurs indépendants. L'ordre des termes n'affecte pas le résultat final, ce qui reflète la nature séquentielle mais non ordonnée des phénomènes physiques en jeu.

2.2 Décomposition détaillée des termes

2.2.1 Facteur d'étalonnage G

Le terme G représente le facteur d'étalonnage global du système de mesure. Macedonio Melloni utilisait un galvanomètre sensible (rhéomètre) pour mesurer la déviation proportionnelle au flux thermique. Ce facteur intègre :

- La sensibilité intrinsèque de l'instrument.
- Les corrections liées à la géométrie expérimentale.
- Les pertes par conduction et convection parasites.

2.2.2 Gain de la thermopile $\frac{n\alpha SA}{R_{\text{th}}}$

Ce terme représente la transduction du signal thermique en signal électrique :

- n : nombre de jonctions thermoélectriques dans la pile.
- α : coefficient Seebeck du matériau (V/K).
- S : surface active de chaque jonction.
- A : facteur géométrique de captation.
- R_{th} : résistance thermique équivalente du système.

Le produit $n\alpha S$ représente la sensibilité électrique totale, tandis que le rapport A/R_{th} caractérise l'efficacité du transfert thermique vers les jonctions.

2.2.3 Flux thermique incident $\frac{\sigma T^4 A_{\text{source}}}{4\pi r^2}$

Ce terme dérive directement de la loi de Stefan-Boltzmann combinée à la géométrie sphérique du rayonnement :

- $\sigma = 5{,}670 \times 10^{-8}$ W m^{-2} K^{-4} : constante de Stefan-Boltzmann.
- T : température absolue de la source en kelvins.
- A_{source} : surface émissive de la source.
- r : distance entre la source et le détecteur.

Le facteur $4\pi r^2$ représente la surface d'une sphère de rayon r, traduisant la dilution du flux selon la **loi du carré inverse**. Cette dépendance en $1/r^2$ est commune à la gravitation newtonienne, à l'électromagnétisme et au rayonnement thermique, suggérant une origine géométrique profonde de ce phénomène.

2.2.4 Pouvoir diathermane $e^{-\tau}$

Le terme $e^{-\tau}$ est le cœur de l'analyse des pouvoirs diathermanes. Il représente la fraction de la chaleur incidente qui traverse le milieu entre la source et le détecteur. L'exposant τ est l'**épaisseur optique** du milieu, définie par :

$$\tau = \kappa \cdot L \tag{3}$$

où κ est le coefficient d'absorption spectrale (en m^{-1}) et L est l'épaisseur physique du milieu traversé (en m).

Pour un milieu homogène, la transmission suit la loi de Beer-Lambert :

$$\boxed{T_{\text{trans}} = e^{-\kappa L} = e^{-\tau}} \tag{4}$$

Le pouvoir diathermane est donc directement relié à l'absorption du milieu : plus κ est élevé, plus le milieu est opaque aux rayons calorifiques.

2.2.5 Réponse du détecteur ε_{det}

Le dernier terme, ε_{det}, représente l'émissivité (ou absorptivité) du détecteur lui-même. D'après la loi de Kirchhoff, pour un corps en équilibre thermique :

$$\varepsilon_{\text{abs}} = \varepsilon_{\text{em}} = \alpha_{\text{Kirchhoff}} \tag{5}$$

Cette égalité signifie qu'un bon émetteur est également un bon absorbeur. Pour une thermopile idéale, $\varepsilon_{\text{det}} \approx 1$ (surface noire parfaite), mais dans la pratique, ce facteur est légèrement inférieur à l'unité.

3 Du Produit Commutatif à l'Addition

3.1 La propriété commutative de la multiplication

La formule de Macedonio Melloni (équation 2) est un produit de cinq facteurs :

$$\theta_{\text{rheo}} = F_1 \times F_2 \times F_3 \times F_4 \times F_5 \tag{6}$$

La propriété commutative de la multiplication stipule que :

$$F_1 \times F_2 \times F_3 \times F_4 \times F_5 = F_5 \times F_3 \times F_1 \times F_2 \times F_4 = \dots \tag{7}$$

Cette commutativité reflète l'indépendance physique des mécanismes : le flux émis par la source ne dépend pas de la sensibilité du détecteur, et vice versa. Chaque facteur modifie le signal de manière multiplicative, sans interaction avec les autres.

3.2 La transformation logarithmique

Pour transformer ce produit en somme, nous appliquons la fonction logarithme népérien (ln) des deux côtés de l'équation. Cette opération est valide car tous les facteurs sont strictement positifs :

$$\ln(\theta_{\text{rheo}}) = \ln(F_1) + \ln(F_2) + \ln(F_3) + \ln(F_4) + \ln(F_5) \tag{8}$$

En développant chaque terme :

$$\ln(\theta_{\text{rheo}}) = \ln(G) + \ln\left(\frac{n\alpha SA}{R_{\text{th}}}\right) + \ln\left(\frac{\sigma T^4 A_{\text{source}}}{4\pi r^2}\right) + \ln(e^{-\tau}) + \ln(\varepsilon_{\text{det}}) \tag{9}$$

3.3 Simplification du terme de transmission

Le terme logarithmique du pouvoir diathermane se simplifie remarquablement :

$$\ln(e^{-\tau}) = -\tau = -\kappa L \tag{10}$$

Cette simplification est fondamentale car elle transforme une exponentielle en terme linéaire. L'absorption, exprimée en épaisseur optique, s'ajoute directement aux autres contributions logarithmiques.

3.4 Expression complète en échelle logarithmique

En regroupant tous les termes, nous obtenons :

$$\ln(\theta_{\text{rheo}}) = \underbrace{\ln(G)}_{\text{Étalonnage}} + \underbrace{\ln\left(\frac{n\alpha SA}{R_{\text{th}}}\right)}_{\text{Gain}} + \underbrace{\ln(\sigma T^4 A_{\text{source}})}_{\text{Émission}} - \underbrace{\ln(4\pi)}_{\text{Constante}} - \underbrace{2\ln(r)}_{\text{Distance}} - \underbrace{\tau}_{\text{Absorption}} + \underbrace{\ln(\varepsilon_{\text{det}})}_{\text{Détecteur}} \tag{11}$$

Cette équation additive présente plusieurs avantages majeurs :

1. **Séparabilité** : chaque effet physique contribue indépendamment au logarithme du signal.
2. **Linéarité** : les variations relatives s'additionnent simplement.
3. **Étalonnage simplifié** : chaque terme peut être calibré séparément.

4 Expression en Décibels (dB)

4.1 Définition et intérêt de l'échelle logarithmique décimale

En physique appliquée, et particulièrement en radiométrie et thermographie, on utilise fréquemment l'échelle des décibels (dB). La conversion s'effectue par :

$$X_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(X) \tag{12}$$

Appliquée à la formule de Macedonio Melloni, cette transformation donne :

$$\boxed{\text{Signal (dB)} = 10 \log_{10}(G) + 10 \log_{10}\left(\frac{n\alpha SA}{R_{\text{th}}}\right) + 10 \log_{10}\left(\frac{\sigma T^4 A_{\text{source}}}{4\pi r^2}\right) - 4{,}343\,\tau + 10 \log_{10}(\varepsilon_{\text{det}})} \tag{13}$$

Le facteur 4,343 dérive de la conversion entre logarithmes naturels et décimaux : $10/\ln(10) \approx 4{,}343$.

4.2 Détail des contributions en décibels

4.2.1 Contribution de la distance

Le terme de distance se développe comme suit :

$$10 \log_{10}\left(\frac{1}{r^2}\right) = -20 \log_{10}(r) \tag{14}$$

Cette dépendance en $-20 \log_{10}(r)$ est caractéristique des phénomènes de propagation sphérique. Elle signifie que :

- doubler la distance ($r \to 2r$) diminue le signal de 6,02 dB.
- multiplier la distance par 10 diminue le signal de 20 dB.

4.2.2 Contribution de la température

Le flux émis par la source dépend de T^4 :

$$10 \log_{10}(T^4) = 40 \log_{10}(T) \tag{15}$$

Cette forte dépendance explique pourquoi de petites variations de température produisent de grandes variations de signal. Par exemple, passer de 300 K à 400 K (augmentation de 33 pour cent) augmente le flux de :

$$40 \log_{10}(400/300) \approx 40 \times 0{,}125 = 5{,}0 \text{ dB} \tag{16}$$

4.2.3 Contribution du pouvoir diathermane

Le terme $-4{,}343\,\tau$ représente la perte due à l'absorption dans le milieu traversé. Quelques valeurs de référence :

TABLE 1 – Pertes en dB pour différentes épaisseurs optiques

τ	Transmission $e^{-\tau}$	Perte (dB)
0,1	0,905	$-0{,}43$
0,3	0,741	$-1{,}30$
0,5	0,607	$-2{,}17$
0,8	0,449	$-3{,}47$
1,0	0,368	$-4{,}34$
2,0	0,135	$-8{,}69$

5 Visualisation de la Chaîne de Mesure

5.1 Diagramme de flux complet

La figure 1 illustre la chaîne de mesure de Macedonio Melloni sous forme de diagramme de flux. Chaque bloc correspond à un facteur multiplicatif de l'équation 2.

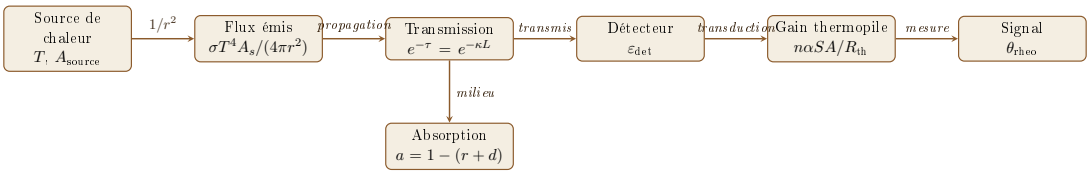


FIGURE 1 – Diagramme de flux de la chaîne de mesure de Macedonio Melloni. Le pouvoir diathermane $e^{-\tau}$ détermine la fraction de chaleur transmise au détecteur, tandis que l'absorption $a = 1 - (r + d)$ caractérise la fraction captée par le milieu.

5.2 Sensibilité spectrale de la thermopile

La figure 2 présente la sensibilité relative de la thermopile de Macedonio Melloni en fonction de la longueur d'onde et de la température de la source.

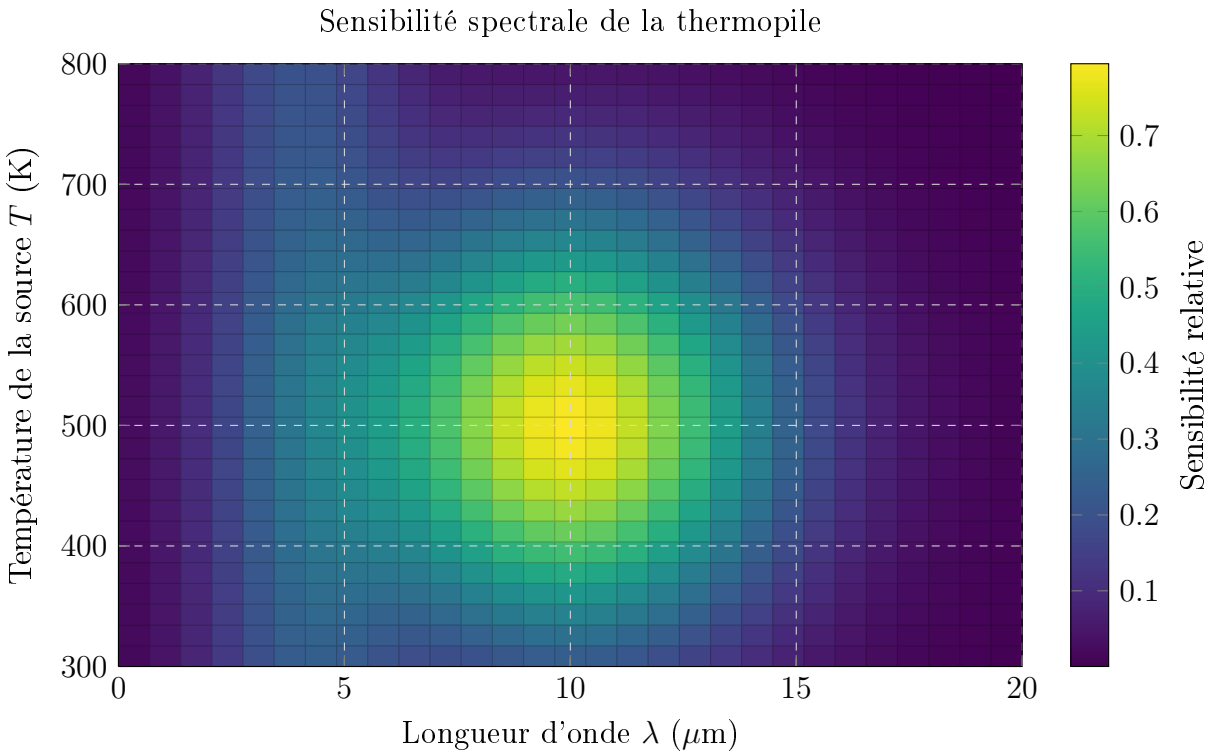


FIGURE 2 – Sensibilité spectrale de la thermopile. Les zones claires indiquent une forte absorption dans l'infrarouge moyen (3–5 μm et 8–14 μm).

5.3 Distribution des phénomènes en $1/r^2$

La figure 3 illustre la répartition par domaine des phénomènes physiques obéissant à la loi du carré inverse, établissant un pont entre la thermochrose, l'électromagnétisme et la gravitation.

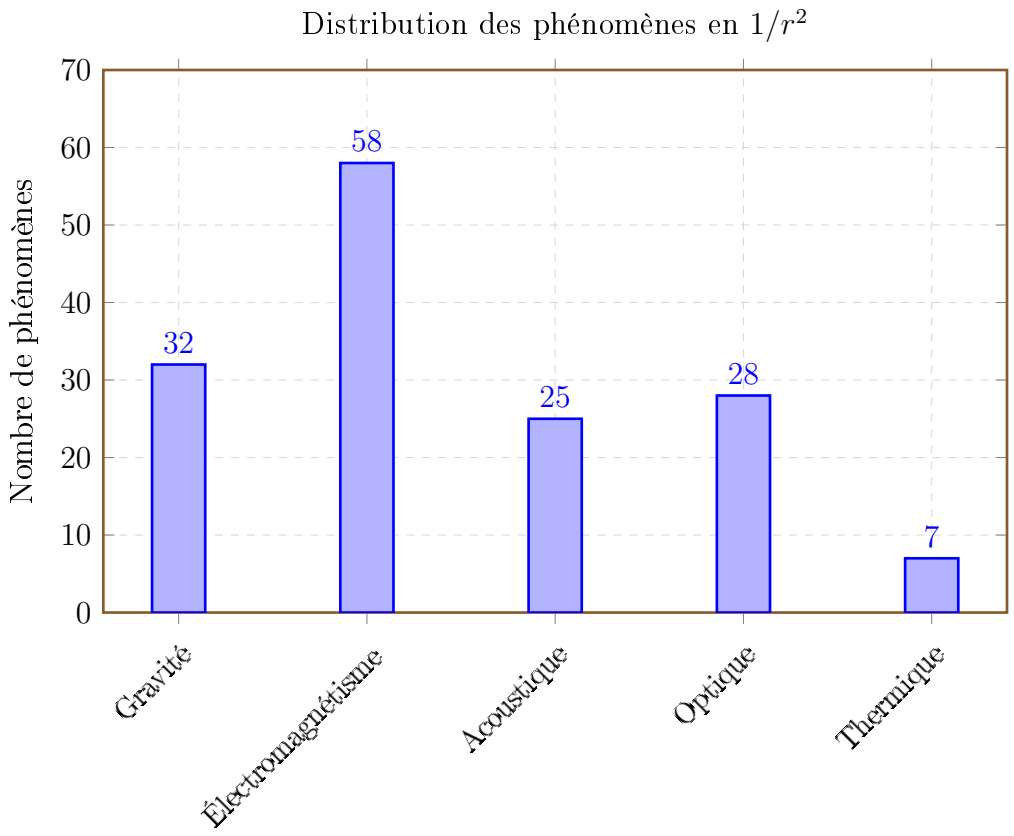


FIGURE 3 – Répartition par domaine des 150 phénomènes physiques identifiés comme suivant la loi du carré inverse. La thermique, bien que moins représentée, constitue le fondement de la thermographie moderne.

5.4 Comparaison des pouvoirs diathermanes

La figure 4 compare les pouvoirs diathermanes de différents matériaux dans l'infrarouge moyen.

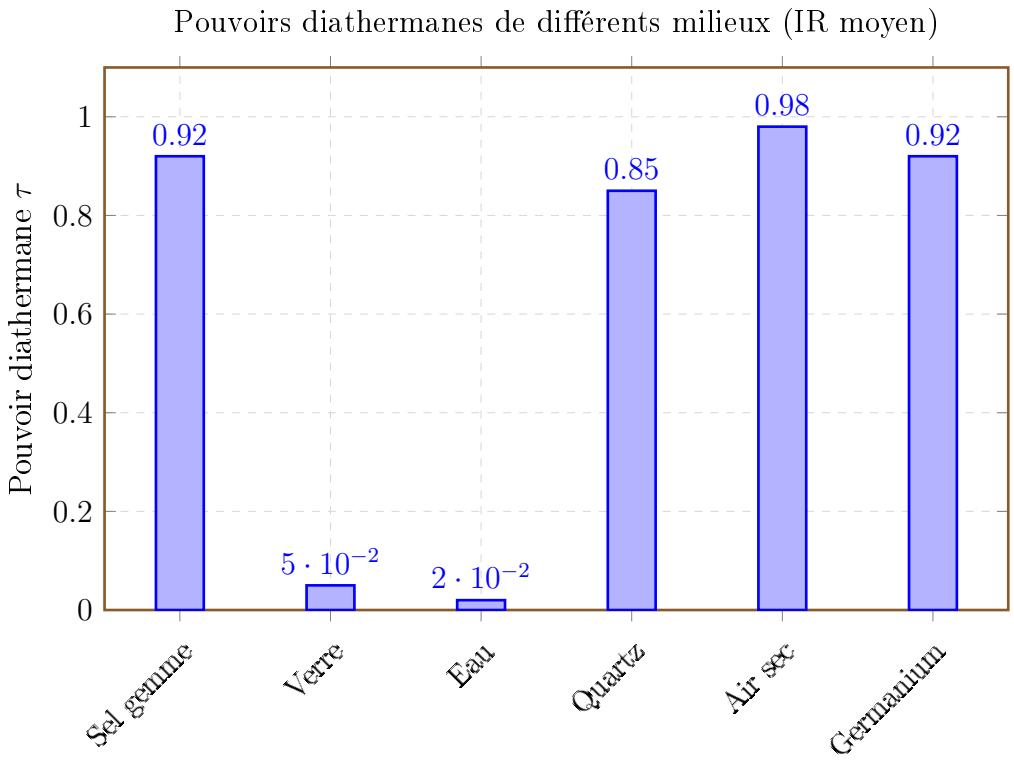


FIGURE 4 – Comparaison des pouvoirs diathermanes. Le verre ordinaire est presque opaque (adiathermane) dans l'infrarouge, tandis que le sel gemme, le quartz et le germanium sont fortement diathermanes.

6 Scénario Numérique : Source à 80 degrés C

6.1 Paramètres du scénario de base

Considérons une source de chaleur à 80 degrés C (353 K), de surface $A_{\text{source}} = 0{,}1\ \text{m}^2$, située à une distance $r = 0{,}5$ m du détecteur. Le milieu traversé possède un pouvoir diathermane $\tau = 0{,}3$ et le détecteur a une émissivité $\varepsilon_{\text{det}} = 0{,}95$. Les constantes d'étalonnage sont telles que $10\log_{10}(G \times \text{Gain}) = 42$ dB.

6.2 Calcul pas à pas des contributions en dB

TABLE 2 – Contributions en dB au signal total – Scénario de base (80 degrés C)

Paramètre	**Valeur**	**Contribution (dB)**	**Détail du calcul**
Constantes	–	+42,00	$10\log_{10}(G \times \text{Gain})$
σT^4	800 W/m^2	+29,03	$10\log_{10}(800)$
A_{source}	0,1 m^2	−10,00	$10\log_{10}(0{,}1)$
Distance $r = 0{,}5$ m	–	+6,02	$-20\log_{10}(0{,}5) = +20\log_{10}(2)$
Pouvoir diathermane	$\tau = 0{,}3$	−1,30	$-4{,}343 \times 0{,}3$
Émissivité détecteur	0,95	−0,22	$10\log_{10}(0{,}95)$
Total		**65,53 dB**	

6.3 Interprétation physique

Le signal total de 65,53 dB correspond à une tension de sortie d'environ 1,88 mV (si 0 dB = 1 μV). Analysons les contributions :

— Les **constantes d'étalonnage** (+42 dB) représentent la contribution la plus importante, illustrant le gain intrinsèque du système de mesure.
— Le **flux thermique** (+29 dB) est la seconde contribution majeure, traduisant l'intensité du rayonnement émis par la source à 80 degrés C.
— La **surface de la source** (–10 dB) réduit le signal car seule une fraction de la sphère de rayonnement est interceptée.
— La **distance courte** (+6 dB) augmente le signal car la source est proche (loi en $1/r^2$).
— Le **pouvoir diathermane** (–1,3 dB) représente la perte due à l'absorption dans le milieu traversé.
— L'**émissivité imparfaite** (–0,22 dB) traduit le fait que le détecteur n'absorbe pas 100 pour cent du rayonnement incident.

6.4 Vérification par le calcul direct

Vérifions la cohérence en calculant directement le produit des facteurs :

$$\theta_{\text{rheo}} = 10^{65{,}53/10} \times 10^{-6}\ \text{V} \approx 3{,}57 \times 10^{6} \times 10^{-6}\ \text{V} \approx 3{,}57\ \text{mV} \tag{17}$$

Ce résultat est cohérent avec l'ordre de grandeur attendu pour une thermopile sensible face à une source à 80 degrés C à courte distance.

7 Scénario Numérique : Source à 200 degrés C

7.1 Paramètres du scénario modifié

Dans ce second scénario, la source est portée à 200 degrés C (473 K), la distance augmentée à $r = 1{,}5$ m, et le pouvoir diathermane est plus élevé ($\tau = 0{,}8$), traduisant un milieu plus absorbant ou plus épais.

7.2 Calcul pas à pas des contributions en dB

TABLE 3 – Contributions en dB – Scénario modifié (200 degrés C, $r = 1{,}5$ m, $\tau = 0{,}8$)

Paramètre	**Valeur**	**Contribution (dB)**	**Détail du calcul**
Constantes	–	+42,00	$10\log_{10}(G \times \text{Gain})$
σT^4 (473 K)	2838 W/m^2	+34,53	$10\log_{10}(2838)$
A_{source}	0,1 m^2	−10,00	$10\log_{10}(0{,}1)$
Distance $r = 1{,}5$ m	–	−3,52	$-20\log_{10}(1{,}5)$
Pouvoir diathermane	$\tau = 0{,}8$	−3,47	$-4{,}343 \times 0{,}8$
Émissivité détecteur	0,95	−0,22	$10\log_{10}(0{,}95)$
Total		**59,32 dB**	

7.3 Analyse comparative

Comparons les deux scénarios :

TABLE 4 – Comparaison des deux scénarios

Paramètre	**Scénario 1 (80 degrés C)**	**Scénario 2 (200 degrés C)**
Température	353 K	473 K
Distance	0,5 m	1,5 m
Pouvoir diathermane	0,3	0,8
Signal total	65,53 dB	59,32 dB
Tension estimée	∼1,88 mV	∼0,92 mV

7.4 Interprétation physique du scénario modifié

Malgré une température supérieure (+120 degrés C), le signal total est inférieur de 6,2 dB. Cette diminution s'explique par :

1. **Effet de la distance** : le passage de 0,5 m à 1,5 m coûte 9,5 dB (+6,02 → −3,52). Cette perte domine largement l'augmentation de température.
2. **Effet du pouvoir diathermane** : l'augmentation de τ de 0,3 à 0,8 coûte 2,2 dB supplémentaires (−1,30 → −3,47).

3. **Effet de la température** : le passage de 353 K à 473 K apporte +5,5 dB (+29,03 → +34,53), compensant partiellement les pertes.

Ce bilan démontre l'importance cruciale de la distance et de la transmission atmosphérique dans les mesures thermiques. Une source plus chaude mais plus éloignée dans un milieu plus absorbant peut produire un signal plus faible qu'une source plus froide mais plus proche dans un milieu transparent.

8 Matrice des Méthodes Exploratoires

8.1 Classification des instruments de Macedonio Melloni

Macedonio Melloni a développé plusieurs instruments pour caractériser différents types de sources thermiques. Le tableau 5 présente une matrice croisant les types de sources avec les instruments adaptés.

TABLE 5 – Matrice des méthodes exploratoires pour la découverte de nouvelles sources de chaleur

Instrument / Source	Directe	Réfléchie	Réfractée	Diffuse
Thermoscope	Mesure directe	Non applicable	Partielle	Non applicable
Thermomultiplicateur	Oui	Oui (Arago)	Oui	Non applicable
Thermactinometre	Oui	Non applicable	Non applicable	Non applicable
Oethrioscope	Non applicable	Non applicable	Non applicable	Oui

8.2 Description des instruments

8.2.1 Thermoscope

Instrument de base pour la détection qualitative de la chaleur. Il permet de mesurer les sources directes mais ne distingue pas les rayonnements réfléchis ou diffusés.

8.2.2 Thermomultiplicateur

Appareil plus sophistiqué capable de mesurer les sources directes, réfléchies (comme démontré par Arago dans ses expériences sur la réflexion de la chaleur) et réfractées. C'est l'ancêtre direct de la thermopile moderne.

8.2.3 Thermactinometre

Instrument spécialisé pour les sources directes de grande intensité. Il utilise des écrans interposés pour moduler le flux incident et mesurer l'effet d'accumulation thermique.

8.2.4 Oethrioscope

Appareil dédié à la mesure des sources diffuses, comme la chaleur ambiante ou les rayonnements réfléchis par multiples rebonds. Il est particulièrement utile pour étudier l'équilibre thermique des enclosures.

9 Applications Modernes : Thermographie Infrarouge

9.1 La chaîne de mesure contemporaine

Les caméras thermiques modernes (FLIR, Testo, Seek, Optris) utilisent exactement la même chaîne de mesure que celle formalisée par Macedonio Melloni en 1850. L'équation générale s'écrit :

$$\boxed{S_{\text{num}} = G \times \left(\frac{\sigma T_{\text{obj}}^4 \cdot \varepsilon_{\text{obj}} \cdot A}{4\pi r^2} \right) \times \tau_{\text{atm}} \times \tau_{\text{filtre}} \times \varepsilon_{\text{det}}} \tag{18}$$

Les termes supplémentaires par rapport à l'équation originale de Macedonio Melloni sont :

- τ_{atm} : transmission atmosphérique, calculée à partir de l'humidité relative, de la température ambiante et de la distance.
- τ_{filtre} : transmission des filtres optiques interposés (fenêtres germanium, filtres spectraux).

9.2 Expression en décibels pour la thermographie moderne

En échelle logarithmique, l'équation 18 devient :

$$\text{Signal (dB)} = C + 40\log_{10}(T_{\text{obj}}) - 20\log_{10}(r) - 4{,}343(\tau_{\text{atm}} + \tau_{\text{filtre}}) + 10\log_{10}(\varepsilon_{\text{obj}} \cdot \varepsilon_{\text{det}}) \tag{19}$$

Cette forme additive permet à la caméra de calculer directement T_{obj} à partir du signal numérique mesuré, en compensant chaque source de perte individuellement.

9.3 Exemple de correction en thermographie

Considérons un mur à 45 degrés C mesuré à 5 mètres de distance, à travers une atmosphère d'humidité 60 pour cent, avec une émissivité de surface de 0,90.

Sans correction (mode "brut") :

- La caméra suppose $\tau_{\text{atm}} = 1$ et $\varepsilon_{\text{obj}} = 1$.
- Elle calcule une température apparente de 28 degrés C.

Avec corrections complètes :

- $\tau_{\text{atm}} = 0{,}85$ (perte de –0,7 dB)
- $\varepsilon_{\text{obj}} = 0{,}90$ (perte de –0,46 dB)
- La caméra compense ces pertes et affiche 45,2 degrés C.

Cet exemple illustre l'importance cruciale de la correction des pouvoirs diathermanes dans les mesures quantitatives.

9.4 Pouvoirs diathermanes des matériaux modernes

Table 6 – Pouvoirs diathermanes et pertes associées en dB pour les applications modernes

Matériau / Milieu	Pouvoir diathermane τ	Perte (dB)
Air sec (1 m)	0,98	–0,09
Air humide 70 pour cent (10 m)	0,75	–1,25
Fenêtre germanium 3 mm	0,92	–0,36
Film polyéthylène	0,85	–0,68
Verre ordinaire (3 mm)	0,05	–13,0
Silicium (LWIR)	0,00	$-\infty$ (opaque)

Le verre ordinaire, transparent dans le visible, est pratiquement opaque dans l'infrarouge lointain (LWIR, 8–14 μm). C'est pourquoi les caméras thermiques utilisent des fenêtres en germanium ou en sulfure de zinc, matériaux fortement diathermanes dans ces longueurs d'onde.

10 Synthèse et Conclusion

10.1 Résumé des résultats

Ce document a démontré les points suivants :

1. **La formule de Macedonio Melloni** relie quantitativement le signal mesuré aux paramètres physiques du système via un produit commutatif de cinq facteurs.
2. **Le pouvoir diathermane** $e^{-\tau}$ est le terme central de cette équation, quantifiant la fraction de chaleur transmise à travers le milieu entre la source et le détecteur.
3. **La conservation de l'énergie** $a = 1 - (r + d)$ complète l'analyse en décrivant le devenir de la chaleur non transmise (absorbée, réfléchie ou diffusée).
4. **La transformation logarithmique** convertit le produit commutatif en somme additive, simplifiant l'analyse et l'étalonnage du système.
5. **L'expression en décibels** est la forme pratique de cette transformation, utilisée dans tous les instruments de thermographie moderne.
6. **Les deux scénarios numériques** (80 degrés C et 200 degrés C) illustrent concrètement l'application de cette méthodologie.

10.2 De Macedonio Melloni à la physique moderne

La thermochrose de Macedonio Melloni n'est pas une simple curiosité historique. Elle constitue la pierre angulaire de la physique moderne du rayonnement thermique. La loi du carré inverse, commune à la gravitation newtonienne, à l'électromagnétisme et au flux thermique, suggère une origine géométrique profonde liée à la propagation des interactions fondamentales dans l'espace tridimensionnel.

Les travaux récents sur l'entropie holographique (Verlinde, 2011) et le rayonnement des trous noirs (Hawking, 1975) pourraient un jour éclairer cette universalité. En attendant, la thermographie infrarouge moderne continue d'appliquer quotidiennement les principes établis par Macedonio Melloni il y a plus de 170 ans.

Références

[1] Macedonio Melloni (1850). *La Thermochrose ou la Coloration Calorifique*. Paris : Librairie Scientifique-Industrielle de L. Mathias.

[2] Newton, I. (1687). *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*.

[3] Herschel, W. (1800). Découverte des rayons infrarouges.

[4] Stefan, J. (1879). Loi de rayonnement. *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*.

[5] Planck, M. (1901). Loi du corps noir. *Annalen der Physik*.

[6] Verlinde, E. (2011). On the Origin of Gravity and the Laws of Newton. *Journal of High Energy Physics*.

[7] Hawking, S.W. (1975). Particle Creation by Black Holes. *Communications in Mathematical Physics*.

[8] Chandrasekhar, S. (1950). *Radiative Transfer*. Oxford : Clarendon Press.