Fonctionnement d'une caméra thermique à base de MLX-90640 et de ESP32-C3

Alain Bertout F6KFA

Novembre 2026

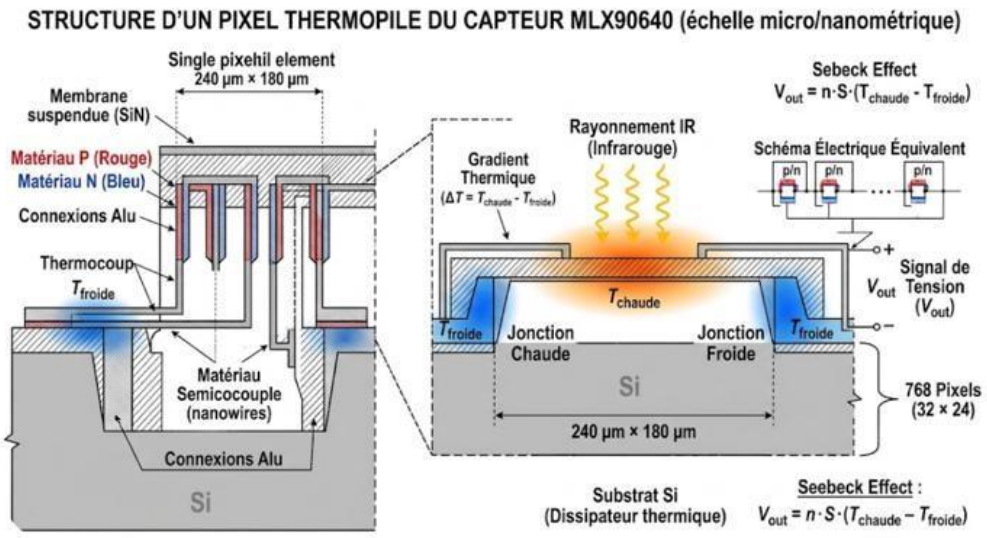
1. Le principe physique : la thermopile

Tout objet possède une température supérieure au zéro absolu (−273,15 ∘ C) et émette ainsi un rayonnement infrarouge. Le composant MLX90640 capte ce rayonnement à l'aide d'une matrice de thermopiles.

Lorsque le rayonnement infrarouge frappe le capteur, il échauffe la jonction PN en silicium de la thermopile. Cet échauffement génère une micro-tension électrique (effet Seebeck) directement proportionnelle au flux thermique reçu.

$$V = S*(T\ chaud - T\ froid)$$

Une thermopile est constituée de plusieurs thermocouples, car un seul thermocouple ne produit qu'une tension très faible, généralement de quelques microvolts par degré Celsius. Pour augmenter cette tension, plusieurs thermocouples sont montés en série dans le MLX906400.



Rayonnement IR et effet Seebeck

2. Une matrice de 768 points (pixels thermiques)

Contrairement aux capteurs ponctuels qui ne mesurent la température qu'un seul point, le MLX90640 contient un tableau de 32 × 24 pixels (en tout 768 thermopiles individuellement adressables). Chaque pixel mesure la température d'une zone précise du champ de vision. La caméra balaie jusqu'à 64 Hz cette matrice ligne par ligne ou colonne par colonne pour mettre à jour la carte 2D des températures.

3. Du signal analogique à la carte thermique

Le composant MLX-90640 embarque les fonctions suivantes :

Conversion A/N interne : Les tensions variables de chaque pixel sont amplifiées et converties en valeurs numériques via un convertisseur analogique-numérique (ADC) de 16 bits intégré au composant.

Compensation de température ambiante : La température propre de la puce influence les mesures. Le MLX90640 intègre un capteur de température interne (PTAT) qui corrige les dérives thermiques du composant lui-même.

La transmission I²C et le microcontroleur:

Les données brutes de la matrice ainsi que les paramètres de calibration stockés dans l'EEPROM intégrée sont envoyées au microcontrôleur (ESP32) via le bus I²C.

Le microcontrôleur utilise les équations mathématiques développées par son fabricant Melexis pour convertir les données brutes en degrés Celsius (° C), puis applique un algorithme d'interpolation bicubique pour lisser la grille de 32×24 et générer une image thermique exploitable à plus grande échelle.

Caractéristiques techniques principales :

Résolution.....32 × 24 pixels (768 zones)

Plage de mesure .....−40° C à +300° C

Précision .....±1° C à ±1,5° C

Champs de vision (FoV) .....55° × 35° (standard) ou 110° × 75° (grand angle)

Fréquence de rafraîchissement.....Ajustable de 0,5 Hz à 64 Hz

L’interpolation bicubique

L'interpolation bicubique est une méthode mathématique utilisée pour lisser, agrandir et "adoucir" une image en estimant les valeurs des pixels manquants entre ceux qui existent déjà. Voici comment elle fonctionne :

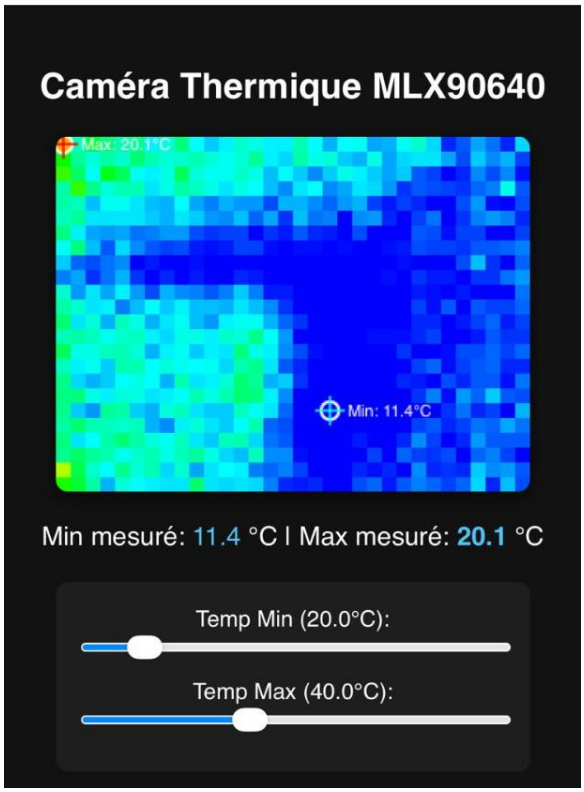
Le capteur MLX90640 fournit une grille thermique très grossière de 32 × 24 pixels soit seulement 768 points de mesure au total. Si on affichait cette image brute directement sur un écran moderne (qui fait par exemple 640 × 480 pixels), on verrait de gros carrés de pixels pixélisés. L'interpolation bicubique sert à intercaler de nouveaux pixels pour transformer cette petite grille en une image haute résolution fluide et plus agréable à l'œil.

Contrairement à des méthodes simples (comme l'interpolation au plus proche, qui se contente de dupliquer les pixels voisins), la méthode bicubique calcule la couleur (ou la température) d'un nouveau pixel en tenant compte des 16 pixels voisins les plus proches (une matrice de 4 x 4 autour du point visé). Elle utilise des courbes cubiques (des polynômes de degré 3) pour tracer une pente douce et continue entre les points de température connus. Cela permet de créer des transitions de couleur progressives (les fameux dégradés thermiques) sans créer de cassures nettes ou d'effets d'escalier. En thermographie, certains algorithmes rendent l'image thermique plus esthétique et facile à interpréter pour l'humain. Le piège est que l’interpolation crée par calcul des données visuelles inexistante. Elle ne donne pas plus de précision au capteur. Par exemple si une source de

chaleur très chaude est minuscule, l'interpolation va l'étaler pour l'adoucir, ce qui peut donner l'impression qu'elle est plus grande qu'elle ne l'est en réalité. Pour obtenir des mesures de précision brute, les techniciens se basent seulement sur les 768 valeurs numériques d'origine.

Le logiciel d'affichage Javascript (PC ou smartphone)

Le terminal d'affichage applique des algorithmes mathématiques comme l'interpolation bicubique pour transformer cette petite grille en une image plus grande (par exemple 320×240 pixels).



Ecran Iphone (image IR sans interpolation bicubique)

Il applique une palette de couleurs (le "colormap" thermique du bleu pour le froid au rouge pour le chaud) pour l'afficher à l'écran. Il positionne la localisation des points de températures maximum et minimum. Il propose des curseurs pour pouvoir modifier les plages de visualisation en arc en ciel.

Un appel à l'utilisation du processeur graphique GPU disponible dans les smartphones et les PC peut aussi permettre d'accélérer les traitements et offrir plus de fluidité au graphisme des températures. L'utilisation de shaders (nuanceurs) reste complémentaire de l'emploi de la création de pixels par interpolation.

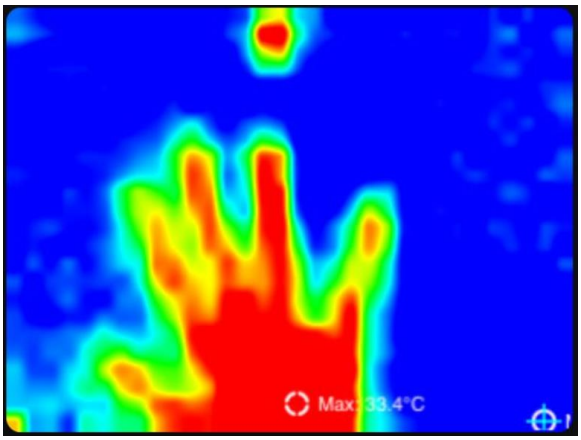


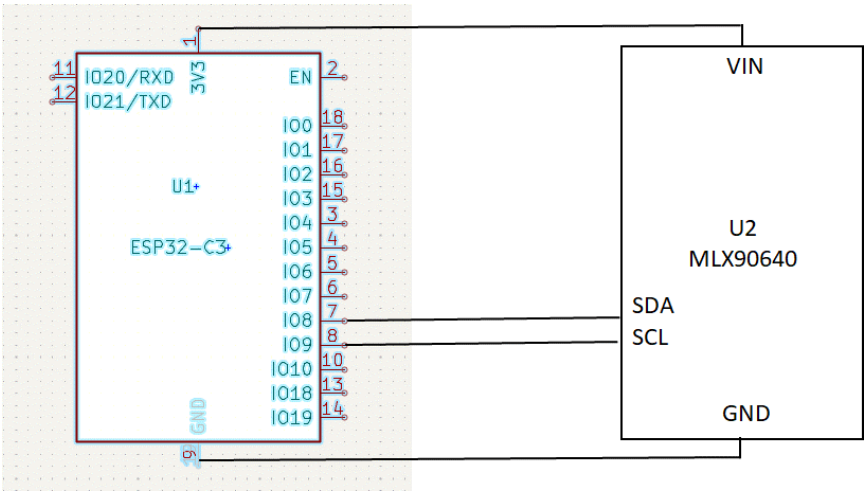
Image IR obtenue par interpolation bicubique et shader

Le logiciel dans l'ESP32

Ce logiciel récupère sur l'interface I2C les 768 valeurs de températures qu'il transmet périodiquement par un texte Json au smartphone. Les échanges se font sans fils sur Wi-Fi.

Le code JavaScript est logé dans la mémoire programme PROGMEM de l'ESP32C3. Il est appelé par le smartphone grâce à un WebService connecté sur l'adresse IP de la fonction routeur du microcontrôleur.

Le schéma électrique



Notes :

L'utilisation des broches IO 20 et IO21 est à éviter car trop interférente avec la radio WiFi de l'ESP32-C3. L'utilisation de supports sur ces broches, même à vide, plante le réseau Wi-Fi.

L'utilisation de l'ESP32-C3 nécessite quelques opérations particulières :

- Choisir dans la famille ESP le Board ESP32-C3 Dev Module
- Pour la première utilisation du circuit enfoncer le bouton Boot puis faire une impulsion sur le bouton Reset.
- Pour autoriser les diagnostiques par SerialPrint (Serial Monitor) dans TOOLS de l'IDE mettre USB CDC sur Enable.