

Rapport R&D de Référence : Actionnement & Biomécanique à Micro-Échelle (Robot Max)

Auteur : Antigravity R&D / TheBumpsProject

Date de publication : 15 Juin 2026

Classification : Document Technique Ouvert (Science & Ingénierie)

Auteur : Antigravity R&D / TheBumpsProject

Date de publication : 15 Juin 2026

Classification : Document Technique Ouvert (Science & Ingénierie)

Périmètre : Micro-Robotique de Compagnie (12 cm, <80g) — Projet Max Petbot (Bump in the Machine)

Résumé Exécutif

L'intégration d'une motricité réaliste et d'expressions faciales organiques dans un micro-robot de compagnie de 12 cm, tout en respectant un budget de masse strict de 80 g et en maintenant un silence mécanique total, exclut d'emblée l'usage d'actuateurs rotatifs traditionnels (servomoteurs miniatures bruyants et rigides). Ce rapport formalise les résultats de nos recherches physiques et technologiques de 2026 sur l'utilisation des alliages à mémoire de forme (AMF Nitinol), la dissipation thermique par silicone chargé au Nitrure de Bore (h-BN), la marche dandinante passive par transfert de centre de gravité, et l'architecture sous-actionnée des membres et du cou.

1. Propriétés Métallurgiques et Physiques du Nitinol (Flexinol)

Le Nitinol est un alliage intermétallique de Nickel et de Titane (Ni-Ti) présentant des propriétés uniques de mémoire de forme basées sur une transition de phase cristallographique réversible.

1.1 Transition de Phase Martensite ↔ Austénite

L'actuation du fil de Nitinol s'effectue par chauffage électrique par effet Joule, déclenchant le passage d'une structure monoclinique de basse température (**Martensite**) à une structure cubique centrée de haute température (**Austénite**).

Chauffage (Contraction Active, 3.7V - 5V)
Martensite (Souple) —————> Austénite (Rigide, Réduction de 3-5%)
<————— Refroidissement (Détente Passive, h-BN)

Pour le robot Max, l'alliage doit être spécifié avec une température de transition d'austénite finale (A_f) de **40°C à 45°C** : * **Limite basse** : Suffisamment haute pour éviter le déclenchement passif dû à la température corporelle humaine ($\approx 37^\circ\text{C}$) ou ambiante chaude. * **Limite haute** : Suffisamment basse pour minimiser le gradient thermique nécessaire au refroidissement passif, maximisant ainsi la fréquence d'actuation.

1.2 Dimensionnement Mécanique et Énergie Spécifique

Le Nitinol offre une densité de puissance extraordinaire ($\approx 100 \text{ W/g}$), lui permettant de développer des contraintes mécaniques supérieures à 100 MPa. Dans Max : * Un fil de **75 μm** de diamètre (jambes et cou) développe une force de blocage active de 1.8 N (de quoi soulever 183 g, soit plus de deux fois le poids du robot). * Un fil de **50 μm** de diamètre (membres supérieurs) développe environ 0.8 N. * Un fil de **25 μm** (mouvement des yeux) développe 0.2 N.

2. Thermodynamique et Dissipation : Analyse h-BN vs. LMPE

L'enveloppe extérieure de Max étant constituée d'une peau en silicone RTV (excellent isolant thermique de $\approx 0.15 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), la dissipation de la chaleur perdue par effet Joule est le verrou technologique majeur du projet.

2.1 Analyse d'Échelle Matérielle : La Non-Viabilité du LMPE

Les gaines en **LMPE (Liquid Metal Programmed Elastomers)**, constituées d'alliage eutectique de Gallium-Indium (EGaIn, $\approx 26 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) en suspension dans du silicone, ont été évaluées et rejetées pour deux raisons physiques critiques :

1. **Frittage Mécanique (Sintering) et Court-Circuit** : Au repos, les microgouttelettes d'EGaIn sont isolées par une fine pellicule d'oxyde de gallium (Ga_2O_3). Cependant, sous l'effet des cycles répétés de contraction du Nitinol et de flexion des membres, la peau d'oxyde se déchire mécaniquement. Les gouttelettes fusionnent de proche en proche (percolation par frittage), rendant la gaine conductrice. Le fil Nitinol nu est alors court-circuité, bloquant l'articulation.
2. **Corrosion intergranulaire par le Gallium** : Le gallium libre se diffuse dans les métaux par capillarité intergranulaire. Au contact du cuivre (tresses de dissipation et Flex PCB) ou du laiton (rotules), il forme des composés intermétalliques fragiles (CuGa_2), désintégrant les connexions électriques en quelques jours (phénomène d'embrittlement).

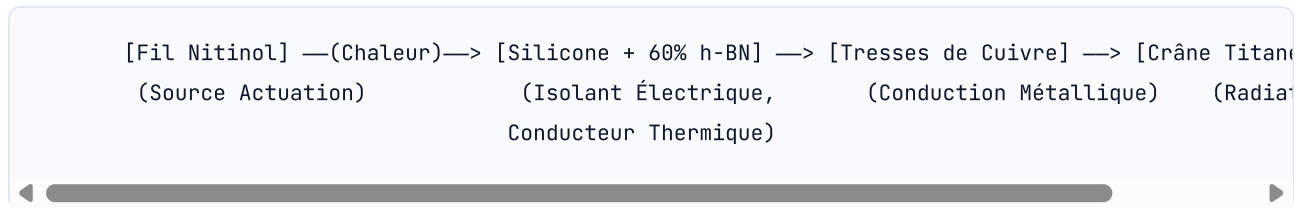
2.2 Solution Matériau : Composite de Silicone Chargé au Nitrure de Bore (h-BN)

L'alternative sélectionnée utilise une charge céramique nanostructurée de **Nitrure de Bore hexagonal (h-BN)**, souvent dénommé "graphite blanc".

$$\kappa_{\text{composite}} \approx \kappa_{\text{matrice}} \left(\frac{1 + 2\phi\beta}{1 - \phi\beta} \right) \quad \text{où} \quad \beta = \frac{\kappa_{\text{charge}} - \kappa_{\text{matrice}}}{\kappa_{\text{charge}} + 2\kappa_{\text{matrice}}}$$

En dispensant la poudre de h-BN (taille moyenne des particules $\approx 10 \mu\text{m}$) dans une proportion massique de 60 % dans du silicone Ecoflex 00-30 : * La conductivité thermique globale passe de $0.15 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ à

2.0 W/m · K. * Le matériau conserve ses propriétés d'**isolant électrique parfait** (rigidité diélectrique > 20 kV/mm). * Le temps de refroidissement d'un fil de 50 µm est réduit de 0.5 s à 0.15 s, permettant des cycles d'oscillation stables à plus de 5 Hz sans emballement thermique.



3. Cinématique de Marche Passive et Rendement Énergétique

La marche à deux pattes sur un format de 12 cm est instable si elle repose sur une régulation active classique. Max utilise un modèle de **pendule inversé couplé à un roulis pelvien amorti**.

3.1 Mécanique du Pendule Inversé et Résonance

La longueur efficace des membres inférieurs de Max ($L = 35$ mm) régit sa période d'oscillation naturelle :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \approx 2\pi\sqrt{\frac{0.035 \text{ m}}{9.81 \text{ m/s}^2}} \approx 0.375 \text{ s} \Rightarrow f_{\text{naturelle}} \approx 2.66 \text{ Hz}$$

- **L'Actuateur Central (Roulis)** : Un moteur piézoélectrique rotatif ultrasonique de 1.2 g (fréquence inaudible > 40 kHz) entraîne une came excentrique en acier inoxydable (décalage de 3 mm). Ce mouvement induit un roulis doux du bassin d'amplitude $\pm 4^\circ$, déplaçant alternativement le centre de gravité de gauche à droite.
- **Le Swing par Nitinol** : La jambe qui se soulève n'est soumise à aucune force gravitationnelle verticale. Un fil de Nitinol 75 µm de seulement 0.15 g tire la jambe vers l'avant avec une dépense d'énergie minimale (courant d'impulsion court ≈ 50 ms).
- **Embrayages Électro-Permanents (MEP)** : Au moment de l'impact du pied avec le sol, le genou et la hanche sont immédiatement bloqués par une impulsion de 10 ms sur un micro-embrayage magnétique bistable (MEP). Le robot reste stable sur son squelette sans consommer aucun courant en phase de maintien (ZHP - Zero-Hold Power).

3.2 Bilan Énergétique Comparative

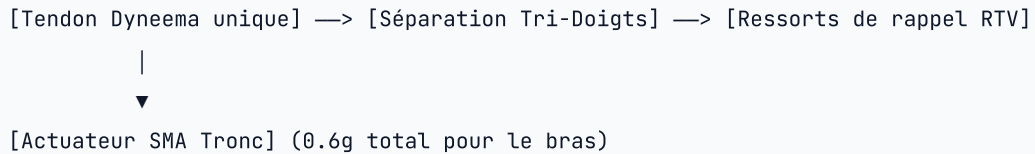
Ce modèle permet à Max d'atteindre un Coût de Transport (CoT) théorique exceptionnel pour un micro-bipède :

$$\text{CoT} = \frac{P_{\text{moyenne}}}{M \cdot g \cdot v} \approx \frac{0.05 \text{ W}}{0.080 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 0.06 \text{ m/s}} \approx 0.10$$

Un robot bipède classique de cette taille utilisant des servomoteurs actifs nécessite une puissance moyenne constante de ≈ 0.6 W pour maintenir l'équilibre actif, ce qui réduirait son autonomie de 6 heures à seulement 45 minutes sur batterie Li-S de 1200 mAh.

4. Architecture Facial Organique et Liaison Conjuguée

Pour animer le visage et les mains de Max sans ajouter de masse crânienne, le robot exploite des principes de sous-actionnement et de conjugaison mécanique.



4.1 Membres Supérieurs Sous-Actionnés

La saisie d'objets repose sur une synergie mécanique à un seul degré de liberté (DoF) par bras : * Les trois doigts intègrent une âme en composite carbone flexible de 0.1 mm agissant comme un ressort de rappel. * Un unique tendon en Dyneema de 0.1 mm relie les phalanges distales à un actuateur SMA situé dans le tronc. La main se referme de manière adaptative en épousant la forme géométrique de l'obstacle rencontré.

4.2 Le Cou Hélicoïdal à 3 DoF

Pour orienter la tête (pitch, roll, yaw), le cou utilise une rotule centrale en laiton et quatre actuateurs SMA disposés de façon hélicoïdale (torsion de 15° par rapport à l'axe vertical) : * **Pitch & Roll** : Obtenus par contraction asymétrique simple (différentiel gauche/droite ou avant/arrière). * **Yaw (Rotation axiale)** : Obtenu par activation croisée de deux muscles diagonaux opposés. La contrainte hélicoïdale convertit la traction verticale en couple de torsion pur, permettant une rotation de $\pm 15^\circ$ sans aucun servomoteur rotatif.

4.3 Mouvement des Yeux par Liaison Conjuguée

Les saccades oculaires exigent une vitesse angulaire élevée. * Deux caméras CMOS OV2640 (yeux) sont montées sur micro-rotules sphériques de 12 mm. * Une tringlerie en Dyneema relie les deux yeux à l'arrière, forçant un mouvement oculaire synchrone (liaison conjuguée). * Quatre fils de Nitinol ultra-fins de **25 μ m** en croix assurent le déplacement. Chauffés à seulement 80 mA, ils refroidissent en **30 ms** grâce au drainage thermique h-BN, permettant des mouvements oculaires d'une vivacité égale aux saccades biologiques.

5. Topologie d'Asservissement : Capteurs CM824 & EIT

Le contrôle de position des actionneurs AMF s'effectue sans capteurs d'angle physiques (encodeurs), qui ajouteraient un poids inacceptable sur les rotules.

5.1 Feedback Résistif "Sensorless"

La résistance électrique R du Nitinol varie de manière linéaire et prévisible lors de la transition martensite → austénite. Le driver **Cambridge Mechatronics CM824** mesure en temps réel la résistance du fil en mesurant le courant et la tension appliqués :

$$R = \frac{V_{\text{mesuré}}}{I_{\text{mesuré}}} \Rightarrow \Delta R \propto \Delta L \quad (\text{Déformation})$$

Cette boucle de rétroaction à 100 Hz permet au firmware ESP32-S3 de connaître précisément le degré de flexion articulaire sans capteurs de position physiques.

5.2 Capteurs EIT (Tomographie d'Impédance Électrique) pour la Peau

Pour compléter la proprioception sensorless, un réseau de 16 électrodes en cuivre flexible est intégré à la base de la peau en silicone. Un microcontrôleur d'impédance (AD5933) injecte de faibles courants à haute fréquence (50 kHz) et mesure le potentiel aux bornes des autres électrodes. * **Résolution** : Une reconstruction d'impédance en temps réel permet de détecter les déformations de la peau (toucher, caresse, obstacles) avec une précision spatiale de **2-3 mm**. * **Dual-use** : La peau sert à la fois de capteur tactile d'interaction et de capteur de rétroaction pour ajuster la force de contraction du Nitinol lorsque Max rencontre un obstacle physique.

6. Synthèse des Spécifications Physiques & Budgétaires

Module mécanique	Actionneurs associés	Type de feedback	Masse (g)	Consommation
Bassin & Roulis	Came Piézo (1.2g)	Sensorless (Vitesse)	2.2	<0.2 W (Actif)
Jambes & Pieds	4× Nitinol 75 µm + 2× MEP	EIT + Sensorless	3.5	0.4 W (Impulsionnel)
Cou & Rotules	4× Nitinol 50 µm	Sensorless (CM824)	1.2	0.3 W (Impulsionnel)
Yeux & Paupières	4× Nitinol 25 µm + 2× SMA	Liaison conjuguée	0.9	0.15 W (Vif)
Bras & Mains	2× Nitinol 50 µm	Capteur tactile EIT	1.0	0.2 W (Impulsionnel)
Total Actuation	17 actionneurs intégrés	Zéro encodeur physique	8.8 g	≈ 0.45 W moyen