

# Expérience faisable — Résonance du cerveau (TIPE)

Thylane Sérié · Sarah Plotkine · Louna Bouflim — Lycée Saint Louis

5 juin 2026

## 1 Ce que l'équipe peut RÉELLEMENT mesurer au lycée

Demande directe de Thylane. Équipe : Thylane Sérié · Sarah Plotkine · Louna Bouflim (Lycée Saint Louis, CPGE).

Cadrage de la prof (2026-06-04) : mesurer  $E$  (module d'Young) et  $\mu$  (viscosité) de 3 matériaux — un fluide newtonien, un slime/fluide complexe, et notre gel-cerveau — puis mettre en avant l'effet de la ROTATION, et en tirer une courbe pour la diapo 7. La prof elle-même doute (« expérience faisable? »). Ce document répond honnêtement.

Statut : brouillon réappropriable (DNA-a). Les chiffres « attendus » sont des ordres de grandeur, pas des résultats — c'est à l'équipe de les mesurer. Voir [PREMORTEM.md](#).

### 1.1 TL;DR — la vérité sur la faisabilité

Partie	Faisable au lycée?	En 1-2 séances?	Robustesse
(1) Fluide newtonien → $\mu$ par chute de bille (Stokes)	OK Oui, TP classique	OK ~1h	Solide — référence connue (glycérine) pour se vérifier
(2) Slime → viscoélasticité	OK Qualitatif + temps de relaxation	OK ~1h	Moyenne — $\mu$ quantitatif difficile, mais la démonstration est nette
(3) Gel-cerveau → $E$ par compression	OK Oui (avec masses + pied à coulisse)	(!) + prise du gel overnight	Moyenne — $E$ à $\pm 30\%$ , suffisant niveau prépa
(3bis) Gel-cerveau → $\mu$ / amortissement	(!) Via décrétement d'oscillation (slow-mo)	OK si gel prêt	Moyenne
(4) Rotation vs translation → courbe diapo 7	OK OUI avec Phyphox (gyroscope) + tracking vidéo	OK filmage 1 séance, tracking le soir	C'est le cœur défendable
Balayage de fréquence 10 → 60 Hz (résonance)	NON Non, fragile	NON	À ne PAS promettre comme manip. Garder en <i>modèle théorique</i> .

Le message dur : le balayage de fréquence pour « voir le pic de résonance à 30 Hz » (protocole 1 de [SYNTHESIS.md](#)) est la partie que la prof a raison de fuir. Exciter un gel à amplitude contrôlée

jusqu'à 60 Hz *et* mesurer sa déformation interne est un sujet de labo, pas de prépa. L'expérience défendable, c'est l'impulsion en rotation (partie 4) : un seul geste, mesurable proprement, qui donne une *vraie* courbe avec vos données. La résonance reste alors le modèle (oscillateur amorti) qui *explique* pourquoi la rotation déforme — pas une manip à rater.

---

## 1.2 Partie 1 — Fluide newtonien : $\mu$ par chute de bille (loi de Stokes)

### 1.2.1 Physique

Une bille qui tombe dans un fluide visqueux atteint une vitesse limite quand poids – poussée = force de Stokes :

$$\frac{4}{3}\pi r^3 (\rho_b - \rho_f) g = 6\pi\mu r v_{\text{lim}}$$

d'où, avec le diamètre  $d = 2r$  :

$$\mu = \frac{(\rho_b - \rho_f) g d^2}{18 v_{\text{lim}}}$$

Condition de validité (à vérifier et à AFFICHER sur la diapo) — régime de Stokes, écoulement laminaire autour de la bille :

$$\text{Re} = \frac{\rho_f v_{\text{lim}} d}{\mu} < 1 \quad (\text{idéalement} < 0,1)$$

Si  $\text{Re} > 1$ , la loi de Stokes surestime la traînée  $\rightarrow \mu$  faux. C'est le piège n°1 et un excellent point à défendre devant le jury (« avez-vous vérifié l'hypothèse ? Oui,  $\text{Re} \approx 0,0X$  »).

### 1.2.2 Matériel exact

- Fluide newtonien de référence : glycérine (pharmacie/droguerie,  $\sim 5$  €/L).  $\mu_{\text{glycérine}} \approx 1,5$  Pa·s à 20 °C  $\rightarrow$  valeur tabulée pour se vérifier. Alternatives : sirop de glucose, miel (plus visqueux,  $\approx 10$  Pa·s), liquide vaisselle pur.
- Éprouvette graduée haute ( $\geq 250$  mL, diamètre  $D$  le plus grand possible — voir correction de paroi). Au pire un tube/bouteille transparente droite.
- Billes : billes d'acier de roulement ( $\varnothing 2\text{--}5$  mm, quelques centimes), ou billes de plomb de pêche. Mesurer leur  $\varnothing$  au pied à coulisse et leur masse à la balance ( $\rightarrow \rho_b$ ).
- Smartphone en slow-motion (120 ou 240 fps) sur trépied/pile de livres, face à l'éprouvette.
- Deux repères (élastiques, marqueur) sur l'éprouvette, distants de  $L$  connu, loin du sommet (pour que  $v_{\text{lim}}$  soit atteinte) et loin du fond (pour éviter l'effet de fond).
- Thermomètre :  $\mu$  de la glycérine chute de moitié pour +5 °C  $\rightarrow$  noter  $T$  à chaque mesure. Piège n°2.

### 1.2.3 Étapes

1. Remplir l'éprouvette, laisser reposer (bulles → erreur). Noter  $T$ .
2. Lâcher une bille sans vitesse initiale, au centre (paroi proche = traînée augmentée).
3. Filmer en slow-mo ; mesurer le temps  $\Delta t$  entre les deux repères →  $v_{\text{lim}} = L/\Delta t$ . Vérifier que la vitesse est constante entre les repères (sinon  $v_{\text{lim}}$  pas atteinte).
4. Répéter avec plusieurs diamètres de billes (3–5 tailles) et 3–5 lâchers chacun → barres d'erreur.
5. Calculer  $\mu$  pour chaque, vérifier  $Re < 1$  à chaque fois, comparer à la valeur tabulée de la glycérine.

### 1.2.4 Pièges & corrections

- Correction de paroi (Faxén) si l'éprouvette est étroite :  $v_{\infty} \approx v_{\text{mesurée}} (1 + 2,1 d/D)$ . Prendre  $D \gg d$  pour la rendre négligeable.
- $v_{\text{lim}}$  pas atteinte (tube trop court) → placer le 1er repère plus bas.
- Régime turbulent (grosse bille, fluide peu visqueux) →  $Re > 1$  → réduire  $d$  ou prendre un fluide plus visqueux.

Faisabilité : OK, haute. ~1 h, matériel trivial, et le fait d'avoir une valeur de référence (glycérine) transforme ce TP en *preuve que votre méthode marche* — argument fort pour le jury.

---

## 1.3 Partie 2 — Slime / fluide complexe : montrer la viscoélasticité

### 1.3.1 Physique

Le slime n'est ni un liquide newtonien ni un solide : c'est viscoélastique. Son comportement dépend de la vitesse de sollicitation (nombre de Deborah  $De = \tau_{\text{relaxation}}/\tau_{\text{observation}}$ ) :

- lentement ( $De \ll 1$ ) → il coule comme un liquide (visqueux) ;
- vite ( $De \gg 1$ ) → il rebondit / casse net comme un solide (élastique).

C'est exactement la propriété qui rend le cerveau dangereux en choc rapide : sollicité vite (impact), il se comporte de façon rigide et fragile. Le slime est la maquette pédagogique parfaite de ce point.

### 1.3.2 Matériel exact

- Slime maison : colle blanche PVA (~2 €) + activateur (solution pour lentilles + bicarbonate, ou eau boraxée en petite quantité). Recettes partout en ligne. Coût < 5 €.
- Smartphone slow-mo, règle, chronomètre.

### 1.3.3 Mesures FAISABLES (honnête : surtout qualitatif + un temps)

1. Test « coule vs casse » : étirer lentement (s'allonge, flue) puis tirer d'un coup sec (casse net) — filmer en slow-mo, c'est visuellement spectaculaire et démontre De.
2. Test « rebond vs flaque » : faire une boule, la lâcher d'un coup (rebondit un peu = élastique); la poser et attendre (s'étale = visqueux). Mesurer la hauteur  $h(t)$  de la flaque qui s'étale → courbe d'affaissement (fluage).
3. Temps de relaxation  $\tau$  : étirer puis relâcher, filmer le retour élastique en slow-mo → ordre de grandeur de  $\tau$  (de la fraction de seconde à la seconde).
4. Chute de bille dans le slime : refaire la partie 1 → on constate que  $\mu$  n'est PAS constant (dépend de la vitesse) → la loi de Stokes échoue. Ce contraste *Newtonien* ( $\mu$  constant) vs *viscoélastique* ( $\mu$  variable) est un résultat en soi, pas un échec.

Faisabilité : OK pour la démonstration, prudence pour le  $\mu$  chiffré. Un  $\mu$  « absolu » du slime demande un rhéomètre. Mais  $\tau$  (temps de relaxation) et la démonstration De sont accessibles et suffisent. Honnêteté sur la diapo : «  $\mu$  du slime non chiffré — viscoélasticité montrée, pas mesurée en Pa·s ».

---

## 1.4 Partie 3 — Gel-cerveau (agarose / gélatine) : $E$ par compression, $\mu$ par amortissement

### 1.4.1 3a — Module d'Young $E$ par compression

Physique — petite déformation, loi de Hooke en compression uniaxiale :

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{m g}{A} \quad (\text{contrainte})$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (\text{déformation relative})$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{pente de } \sigma \text{ vs } \varepsilon, \text{ aux PETITES déformations } < 10\text{--}15\%)$$

Matériel exact

- Gel coulé en cylindre de dimensions connues (moule : verre, gobelet, tube PVC). Deux options :
  - Agarose 0,5–1 % (épicerie asiatique / labo) → prise en ~30 min à froid.  $E$  attendu  $\approx$  10–30 kPa. OK rapide.
  - Gélatine 8–12 % (supermarché, feuilles ou poudre) → prise au frigo plusieurs heures / overnight.  $E$  attendu  $\approx$  1–20 kPa. (!) PIÈGE TEMPOREL n°1 : préparer la veille.
- Masses connues : pièces de monnaie (1 € = 7,50 g; 2 € = 8,50 g), petites masses marquées, ou godet + eau pesée.
- Pied à coulisse ou règle (mesurer  $\Delta h$  au dixième de mm).

- Plateau rigide léger pour répartir la charge sur toute la surface  $A$ .

## Étapes

1. Couler le gel en cylindre (noter  $\varnothing \rightarrow A = \pi(\varnothing/2)^2$ , et  $h_0$ ).
2. Démouler délicatement, poser sur surface plane, plateau dessus.
3. Empiler les masses une par une (par ex. 20 g, 40 g, 60 g...); à chaque palier, mesurer  $\Delta h$  (attendre  $\sim 10$  s de stabilisation — fluage!).
4. Tracer  $\sigma$  vs  $\varepsilon$ ; la pente initiale =  $E$ . Rester dans le linéaire ( $\varepsilon < 10\text{--}15\%$ ), au-delà le gel devient non-linéaire et peut se fissurer.

Dimensionnement (vérifier que c'est mesurable) : cylindre  $\varnothing 5$  cm  $\rightarrow A \approx 20$  cm<sup>2</sup> =  $2 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>. Masse 100 g  $\rightarrow F = 1$  N  $\rightarrow \sigma = 500$  Pa. Pour  $E = 10$  kPa  $\rightarrow \varepsilon = 0,05 \rightarrow$  si  $h_0 = 5$  cm,  $\Delta h = 2,5$  mm : mesurable au pied à coulisse. OK Pour un gel très mou ( $E = 1$  kPa) la même charge donne  $\varepsilon = 0,5$  (trop)  $\rightarrow$  commencer par de petites masses.

### 1.4.2 3b — Viscosité / amortissement $\mu$ du gel (le gel est un SOLIDE viscoélastique)

Le gel étant réticulé, son «  $\mu$  » n'est pas une viscosité de fluide mais un amortissement viscoélastique. Deux voies faisables :

- Fluage (creep) : poser une charge constante, mesurer  $\Delta h(t)$  qui augmente lentement sur quelques minutes (caméra + chrono)  $\rightarrow$  temps caractéristique  $\tau$ . Modèle de Kelvin-Voigt.
- Décrément logarithmique (élégant, et relie directement au modèle oscillateur de la diapo 7) : planter une masse/bâtonnet dans le gel, donner une chiquenaude, filmer en slow-mo les oscillations amorties. Mesurer la décroissance des amplitudes successives :

$$\delta = \frac{1}{n} \ln\left(\frac{A_0}{A_n}\right) \quad (\text{décrément logarithmique})$$

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (\text{taux d'amortissement})$$

$\zeta$  relie l'amortissement  $c$  (donc  $\mu$ ) à  $k$  et  $m$  du modèle  $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$ . C'est le pont expérimental vers l'équation de la diapo 7.

Faisabilité : OK pour  $E$  (à  $\pm 30\%$ ), prudence pour  $\mu$ . Le pied-à-coulisse + masses donne  $E$  proprement. Le  $\mu$ /amortissement est plus rude mais le décrément log par slow-mo est accessible et paie cher (il matérialise l'oscillateur amorti). Si trop juste en temps : faire  $E$  pour les 3 matériaux,  $\mu$  seulement pour le gel.

Upgrade optionnel (si un  $\cdot e$  élève est à l'aise en élec) : cellule de charge + HX711 + Arduino ( $\sim 5\text{--}8$  €)  $\rightarrow$  courbes force-déplacement, relaxation  $\sigma(t) = \sigma_\infty + (\sigma_0 - \sigma_\infty)e^{-t/\tau}$  et hystérésis automatiques. Beau, mais pas indispensable — ne pas en faire un bloquant.

## 1.5 Partie 4 — Rotation vs translation : LA courbe de la diapo 7

C'est la demande centrale de la prof et, heureusement, la partie la plus solide. Une seule manip impulsionnelle, des données réelles, une vraie courbe.

### 1.5.1 Physique

Affirmation à démontrer (cœur du TIPE, DNA-b) : l'accélération de ROTATION produit plus de déformation interne (cisaillement) que l'accélération de TRANSLATION, à « sévérité » comparable. En translation, le cerveau bouge presque en bloc (peu de cisaillement); en rotation, le centre et la périphérie se déplacent différemment → cisaillement  $\gamma$  maximal → lésions.

### 1.5.2 Le montage « cerveau dans le crâne »

- Boîte rigide transparente (boîte plastique, bocal) = crâne.
- Gel (agarose, partie 3) coulé dedans, avec une grille de marqueurs : croix au feutre sur une face, paillettes/billes colorées noyées, ou grille imprimée collée derrière.
- (option) fine couche d'eau/huile entre gel et paroi = liquide céphalo-rachidien (interaction fluide-structure — qualitatif seulement).

### 1.5.3 Mesure — l'astuce qui rend la courbe RÉELLE : le gyroscope Phyphox

Scotcher le smartphone sur la boîte. Phyphox enregistre alors :

- gyroscope →  $\omega(t)$  → accélération angulaire  $\dot{\omega} = d\omega/dt$  au moment de l'arrêt brutal (axe X de la courbe, mesuré rigoureusement);
- (translation) accéléromètre →  $a(t)$  au moment du choc.

La déformation  $\gamma$  (axe Y) se mesure par tracking vidéo des marqueurs (slow-mo) avec le logiciel Tracker (Open Source Physics, gratuit) ou un petit script Python/OpenCV.  $\gamma_{\max} = (\text{écart différentiel des marqueurs})/(\text{distance})$  au pic.

### 1.5.4 Étapes

1. Translation : faire glisser la boîte sur la table et la stopper net contre une butée. Phyphox (accéléro) donne  $a_{\text{pic}}$  ; la vidéo donne  $\gamma_{\text{translation}}$  (faible).
2. Rotation : monter la boîte sur un pivot (clou, axe, tourne-disque, tabouret pivotant...). La lâcher depuis un angle de départ  $\theta$ , elle tourne et bute → arrêt angulaire brutal. Phyphox (gyro) donne  $\omega$  et  $\dot{\omega}$  ; la vidéo donne  $\gamma_{\text{rotation}}$  (fort).
3. Faire varier l'intensité : répéter la rotation depuis 5–6 angles de départ  $\theta$  croissants → différentes  $\dot{\omega}$  à l'impact → un point ( $\dot{\omega}, \gamma_{\max}$ ) par essai.
4. Tracer  $\gamma_{\max}$  vs  $\dot{\omega}$  : une courbe croissante pour la rotation, et le(s) point(s) translation bien plus bas → la démonstration visuelle de « rotation > translation ».

### 1.5.5 La courbe de la diapo 7 (deux lectures possibles, choisir UNE)

- Lecture A — effet rotation (recommandée, = demande prof) : déformation  $\gamma_{\max}$  (mesurée, vidéo) en fonction de l'accélération angulaire  $\dot{\omega}$  (mesurée, gyro Phyphox), avec deux séries : rotation (monte fort) et translation (reste plat). Étiquette : « MESURÉE — nos données ».
- Lecture B — effet matériau : déformation sous une même impulsion de rotation, comparée entre les 3 matériaux (fluide newtonien sloshe / slime / gel) → quel modèle de cerveau cisaille le plus.

Faisabilité : OK — c'est le pilier. Filmage + Phyphox en 1 séance ; le tracking vidéo se fait le soir (Tracker, gratuit). Les deux axes sont mesurés (gyro + vidéo) → réponse imparable au jury « cette courbe est mesurée ou théorique ? » → mesurée. C'est exactement ce que **PREMORTEM.md** §F1 exige.

---

## 1.6 Plan de séances réaliste

### 1.6.1 AVANT la séance 1 (à la maison, J-1) — (!) piège temporel

- Couler les gels : gélatine overnight au frigo (sinon pas prise), ou agarose le matin même (~30 min). Sans gel prêt, la séance 2 tombe à l'eau.
- Fabriquer le slime (se conserve quelques jours en boîte hermétique).
- Installer Phyphox (gratuit, iOS/Android) et Tracker (gratuit, PC). Faire un test de gyroscope.

### 1.6.2 Séance 1 (~2 h) — caractérisation des matériaux

- Chute de bille dans la glycérine →  $\mu$  newtonien + vérif  $Re < 1$  + comparaison valeur tabulée.
- Slime : tests coule/casse, relaxation, chute de bille ( $\mu$  non constant) — filmés slow-mo.
- Gel : compression avec masses →  $\sigma$ - $\epsilon$  →  $E$ . (+ décrétement log par chiquenaude si le temps.)

### 1.6.3 Séance 2 (~2 h) — rotation vs translation

- Couler/insérer le gel à marqueurs dans la boîte.
- Phyphox scotché : série translation, puis série rotation depuis 5-6 angles.
- Tout filmer en slow-mo.

### 1.6.4 À la maison (J+1) — exploitation

- Tracking vidéo (Tracker) des marqueurs →  $\gamma_{\max}$  par essai.
  - Croiser avec  $\dot{\omega}$  exportée de Phyphox → tracer la courbe diapo 7.
  - Régressions, barres d'erreur, propagation d'incertitude.
-

## 1.7 Ce qui N'EST PAS faisable (à dire honnêtement, pas à cacher)

- NON Balayage de fréquence 10 → 60 Hz à amplitude contrôlée pour « voir » le pic de résonance dans le gel. Exciter proprement *et* mesurer la déformation interne en fonction de  $f$  = sujet de labo (rhéomètre dynamique / vibreur calibré). Garder la résonance comme MODÈLE théorique (oscillateur amorti,  $f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{k/m}$ ) qui *explique* l'amplification — pas comme manip promise. C'est le bon arbitrage : la prof a redirigé vers la rotation précisément pour ça.
  - NON Simulation éléments finis (DHIM/SIMon, LS-DYNA) — à citer, jamais à refaire (DNA-f, S2 de SYNTHESIS).
  - NON  $\mu$  absolu du slime en Pa·s — montrer la viscoélasticité, ne pas prétendre la chiffrer.
  - NON Interaction fluide-structure du LCR quantifiée — l'huile/eau autour du gel reste qualitative.
  - (!)  $E$  à précision labo — viser  $\pm 30\%$  (ordre de grandeur correct, cohérent avec le 0,1–10 kPa du cerveau), c'est le niveau prépa attendu (DNA-f).
- 

## 1.8 Pièges récapitulés (à mettre en diapo 5 « problèmes rencontrés »)

1. Prise du gel overnight — préparer la veille, sinon manip bâclée.
  2.  $Re < 1$  à vérifier pour Stokes — sinon  $\mu$  faux (afficher la valeur de  $Re$ ).
  3. Température —  $\mu$  de la glycérine très sensible ; noter  $T$  à chaque mesure.
  4. Effet de paroi / de fond sur la chute de bille — tube large, repères loin des bords.
  5. Petites déformations pour  $E$  ( $\epsilon < 10\text{--}15\%$ ) — sinon non-linéaire / fissure.
  6. Fluage du gel — attendre la stabilisation avant de lire  $\Delta h$ .
  7. Tracking vidéo bruité — marqueurs contrastés, bon éclairage, fond uni, slow-mo  $\geq 120$  fps.
  8. Reproductibilité du gel — peser précisément la concentration (0,5 % vs 1 % d'agarose  $\approx \times 2$  sur  $E$ ).
- 

## 1.9 Lien avec la modélisation (pont vers la diapo 7)

Les mesures alimentent l'oscillateur amorti forcé  $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$  :

- $E$  (partie 3) → raideur  $k$  ;
- $\mu$  / décrement log (partie 3b) → amortissement  $c$  ;
- la masse de gel →  $m$  ;
- d'où  $f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{k/m}$  : la fréquence propre prédite par vos mesures.

La rotation (partie 4) fournit l'excitation  $F(t)$  la plus déformante et la courbe expérimentale  $\gamma_{\max}(\dot{\omega})$ . Le modèle *explique* la courbe ; il ne la remplace pas. Diapo 7 = la courbe mesurée ; le modèle est en appui, étiqueté « théorique ». (Corrige l'ambiguïté F1 du premortem.)

---

#### 1.10 Sources mobilisées

Loi de Stokes & viscosité, viscoélasticité, propriétés du tissu cérébral : voir le tableau Sources de [SYNTHESIS.md](#) (Galford & McElhaney 1970 [S3], Chakroun [S4], Rowson et al. 2012 [S1] pour rotation > translation, modèles FE DHIM/SIMon [S2]). Phyphox et Tracker (OSP) sont des outils gratuits, à citer comme instruments de mesure.