

Support pédagogique — comprendre et défendre la présentation (TIPE résonance)

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

5 juin 2026

1 Comment utiliser ce support

À qui ça parle. À Thylane, Sarah et Louna. Ce document n'est pas une diapo de plus. C'est le carnet de bord qui se tient à côté de la présentation : pour chaque diapo, il déplie en clair *tout* ce qu'elle dit, mot par mot, pour que chacune de vous puisse non seulement lire la diapo, mais la comprendre et répondre au jury quand il creuse.

L'esprit. Un jury de TIPE ne note pas la beauté du slide. Il note est-ce que l'élève sait de quoi elle parle. La question piège n'est jamais « récite-moi ta diapo », c'est « explique-moi ce mot », « pourquoi cette équation », « cette courbe, elle vient d'où ? ». Ce carnet vous arme pour ça.

L'honnêteté, d'abord. Soyons claires entre nous : l'expérience n'a pas abouti. Le cerveau en gélatine 3D s'est effondré, et aucune grandeur n'a été mesurée — ni le module d'Young E , ni la viscosité μ , ni la courbe rotation. Ce carnet ne sert donc pas à faire semblant d'avoir des résultats. Il sert à comprendre la physique à fond et à défendre la démarche : « *voilà ce qu'on a tenté, voilà pourquoi ça a cassé, voilà ce que la physique prédit, et voilà comment on s'y prendrait.* » Devant un jury, une démarche honnête et bien comprise vaut plus qu'une fausse courbe.

Le carnet a deux parties :

- Partie A — un « topo » par diapo (1 à 7) : l'explication développée de ce que dit la diapo, en langage clair, plus une petite réserve de réponses aux questions que le jury va poser.
- Partie B — le glossaire complet : *tous* les mots techniques de la présentation, chacun avec une définition simple, une image concrète, et son lien avec votre sujet. Quand un mot vous échappe à l'oral, il est là.

2 Partie A — Le topo, diapo par diapo

Comment lire un topo. Chaque section reprend une diapo et la déplie en trois temps :
☐ Ce que dit la diapo (le message en une phrase) · ☐ Le topo développé (l'explication complète, pour comprendre vraiment) · ☐ Si le jury creuse (les questions probables + une réponse tenue). Les mots en *gras* renvoient au glossaire de la Partie B.

2.1 Diapo 1 — Titre et contexte : pourquoi un choc à la tête est dangereux

2.1.1 [?] Ce que dit la diapo

Chaque année, des millions de commotions cérébrales (1,6 à 3,8 M aux États-Unis), et pourtant on comprend mal *physiquement* comment le coup blesse. Notre point de départ, qui surprend : ce n'est pas l'impact lui-même qui abîme le cerveau, c'est son mouvement à l'intérieur du crâne.

2.1.2 [?] Le topo développé

On ouvre sur l'humain avant la moindre équation : un problème de santé énorme, mal expliqué. Puis on retourne l'intuition du jury. Tout le monde imagine que c'est le *choc direct* — le crâne qui prend le coup — qui blesse. Faux, ou presque : le crâne est un casque dur très efficace. Le vrai problème, c'est ce qu'il y a dedans.

Le cerveau est un organe extrêmement mou. On le mesure par son *module d'Young E* (voir glossaire) — le nombre qui dit « à quel point un matériau résiste quand on le déforme ». Pour le cerveau, $E \sim 0,1$ à 10 kilopascals (kPa). Pour donner l'échelle : c'est l'ordre de grandeur d'une gélatine de cuisine, et environ dix millions de fois plus mou que l'acier. Une masse molle comme ça, enfermée dans une boîte rigide, quand la tête est secouée brutalement, continue de bouger alors que le crâne, lui, s'est déjà arrêté. C'est ce décalage interne — pas l'impact — qui déforme et lèse les tissus.

C'est aussi ce qui rend notre étude possible avec trois fois rien : puisque le cerveau est aussi mou qu'un gel, on peut le *modéliser* par un gel. Un simple substitut en gélatine ou en *agarose* tombe dans le même domaine de rigidité.

2.1.3 [?] Si le jury creuse

- « Pourquoi dire que ce n'est pas l'impact? » → Parce que le crâne répartit et encaisse bien le choc direct ; ce qui n'est pas protégé, c'est le mouvement *relatif* du cerveau dans sa cavité. La littérature (Rowson et al. 2012) le confirme : les lésions corrélerent avec le mouvement interne, surtout la rotation, pas avec la force de contact brute.
- « 0,1 à 10 kPa, c'est mou comment? » → Une gélatine de dessert, c'est ~ 1 –20 kPa. Donc le cerveau, c'est entre le flan et la gélatine ferme. L'acier, c'est ~ 200 gigapascals, soit 10^7 fois plus.
- « D'où sort le chiffre 1,6–3,8 millions? » → Estimation du CDC américain (2003), reprise par Rowson et al. (2012). On cite, on n'invente pas.

2.2 Diapo 2 — Problématique : quel mouvement, à quelle fréquence, déforme le plus?

2.2.1 [?] Ce que dit la diapo

La vraie question n'est pas « à quelle force? » mais « à quel type de mouvement, à quel régime? ». Énoncé : existe-t-il, pour un modèle simplifié du cerveau, des sollicitations — une certaine rotation, une certaine fréquence — qui amplifient les déformations internes lors d'un choc?

2.2.2 ¶ Le topo développé

On installe l'image de travail. Le cerveau est un milieu viscoélastique : ni tout à fait solide, ni tout à fait liquide (glossaire). Il est enfermé dans une cavité rigide — le crâne — et baigne dans le liquide céphalo-rachidien (le LCR), une fine couche de liquide qui l'entoure. Quand la tête est secouée, ce milieu mou subit des ondes et des vibrations internes.

Deux choses, et seulement deux, décident de la gravité :

1. Le type de mouvement. Une translation (la tête poussée en ligne droite) fait bouger le cerveau presque en bloc — peu de déformation interne. Une rotation (la tête qui pivote) fait que le centre et la périphérie du cerveau se déplacent différemment : ça cisaille la matière. C'est la rotation qui déforme le plus — la littérature *et* notre intuition pointent dans le même sens.
2. Le régime, c'est-à-dire la fréquence. Un milieu mou possède des *fréquences propres* : des rythmes de sollicitation qu'il amplifie au lieu d'amortir. C'est le phénomène de résonance (glossaire). Une fréquence critique autour de ~ 30 Hz est parfois citée. On la présente comme une hypothèse à vérifier, pas comme un fait : notre propre estimation d'ordre de grandeur donnera plutôt ~ 10 – 30 Hz selon les valeurs qu'on retient (on y revient en diapo 7).

2.2.3 ¶ Si le jury creuse

- « Viscoélastique, ça veut dire quoi exactement? » → Un matériau qui a *à la fois* le ressort d'un solide (il revient) et le frein d'un liquide (il dissipe et coule lentement). Le caramel, le silly-putty : on tire doucement il s'étire comme du miel, on tire d'un coup il casse net. Le cerveau, pareil.
- « Pourquoi la rotation plutôt que la translation? » → Parce que la rotation crée du cisaillement : des couches voisines de matière glissent l'une sur l'autre. Un milieu mou résiste très mal au cisaillement → grande déformation. La translation déplace l'ensemble sans trop le distordre.
- « Résonance, vous voulez dire comme une balançoire? » → Exactement. Pousser une balançoire au bon rythme (sa fréquence propre) → l'amplitude grandit énormément. Mauvais rythme → rien. Le cerveau a aussi un « bon rythme » qui l'amplifie.

2.3 Diapo 3 — Notions scientifiques : les deux nombres qui gouvernent tout

2.3.1 ¶ Ce que dit la diapo

Une seule question commande le reste : comment un matériau mou se déforme-t-il quand on le secoue? Y répondre demande deux nombres mesurables : sa rigidité E (module d'Young) et sa viscosité μ . Plus les équations-clés et le tableau des ordres de grandeur.

2.3.2 ¶ Le topo développé

C'est la diapo « boîte à outils ». L'idée centrale, à dire avec ses mots : un matériau mou ne se résume pas à un seul nombre.

- Un solide se décrit par sa rigidité, le module d'Young E : tu le tires, il s'étire un peu et revient. E grand = dur (acier), E petit = mou (gel).
- Un fluide se décrit par sa viscosité μ : il ne revient pas, il coule, et μ dit à quel point il coule difficilement (eau = fluide, miel = visqueux).
- Le cerveau a les deux à la fois : il se déforme comme un solide *et* il « coule » et « se détend » comme un fluide. C'est ça, viscoélastique. Donc deux nombres à connaître : E et μ .

Les trois équations de base de la déformation (toutes au glossaire) :

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{contrainte}), \quad \varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (\text{déformation}), \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{rigidité}).$$

En clair : la contrainte σ c'est la force étalée sur la surface (une pression); la déformation ε c'est de combien, *en proportion*, l'objet s'écrase ($\Delta h/h_0$, sans unité); et le module d'Young E c'est le rapport des deux — *combien de contrainte il faut pour obtenir une déformation donnée*.

Et l'équation maîtresse, celle qui revient en diapo 7 — l'oscillateur amorti forcé :

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + k x = F(t), \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

On la lit terme à terme (glossaire) : $m\ddot{x}$ = l'inertie (la masse qui résiste à accélérer), $c\dot{x}$ = le frein visqueux (l'amortissement), kx = le rappel du ressort (la rigidité), $F(t)$ = le coup qu'on donne. f_0 est la fréquence propre, le « bon rythme » du système.

Le tableau des ordres de grandeur place le cerveau : 0,1–10 kPa, dans le même domaine que la gélatine (1–20 kPa) et l'agarose (10–30 kPa), très loin du caoutchouc (MPa) et de l'acier (centaines de GPa). C'est ce qui justifie le gel comme substitut.

Une honnêteté à dire à l'oral (☞ une seule, pas dix) : une colonne E d'un de nos documents source affiche des valeurs en unité douteuse. On cite donc l'ordre de grandeur (~kPa), et on ira vérifier le chiffre exact sur le PDF d'origine avant de l'afficher comme une valeur ferme.

2.3.3 ☞ Si le jury creuse

- « Différence entre contrainte et déformation? » → La contrainte σ c'est *ce qu'on impose* (une force par unité de surface, en pascals). La déformation ε c'est *ce qui en résulte* (un raccourcissement relatif, sans unité). E relie cause et effet.
- « Pourquoi ε n'a pas d'unité? » → Parce que c'est un rapport de deux longueurs (Δh en mètres divisé par h_0 en mètres). Les mètres s'annulent. C'est un pourcentage d'écrasement.
- « Vous comparez votre gel au vrai cerveau, c'est légitime? » → Oui *en ordre de grandeur de rigidité* : les deux sont dans la zone du kilopascal. On ne prétend pas que le gel *est* un cerveau, on dit qu'il partage la propriété physique qui nous intéresse : la mollesse viscoélastique.

2.4 Diapo 4 — Schéma de la manip : trois matériaux, puis la rotation

2.4.1 ? Ce que dit la diapo

Le protocole qu'on a conçu (et seul le gel a été tenté, voir diapo 5) : mesurer E et μ sur trois matériaux, du plus simple au plus proche du cerveau, puis regarder l'effet de la rotation. Le tout interprété par un oscillateur masse-ressort-amortisseur.

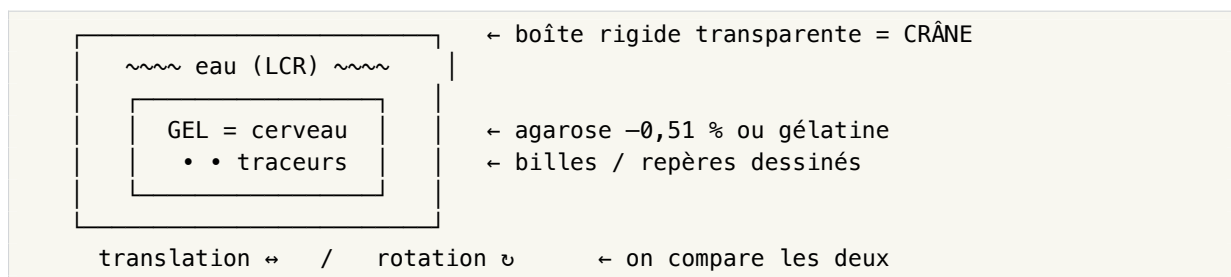
2.4.2 ? Le topo développé

La logique des trois matériaux, c'est une montée en complexité :

Matériau	Ce qu'il représente	Ce qu'on mesurerait	Comment
Fluide newtonien (glycérine)	la viscosité pure, le cas étalon	μ	chute de bille (loi de Stokes)
Fluide complexe (slime)	un milieu qui flue <i>et</i> résiste	comportement visco-élastique	tests « coule vs casse », relaxation
Gel « cerveau » (agarose)	notre cerveau modèle	E (et un peu μ)	compression par masses + chute de bille

- On commencerait par un fluide newtonien (la glycérine, du sirop) : un liquide dont la *seule* grandeur intéressante est la viscosité μ , et qui reste constante quoi qu'on fasse. On la mesure par chute de bille : on lâche une bille, elle atteint une vitesse limite, et la *loi de Stokes* relie cette vitesse à μ (glossaire). C'est notre cas étalon : la glycérine a une valeur tabulée connue ($\sim 1,5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$), donc on *vérifie que notre méthode marche*.
- Puis le slime : il montre qu'un *même* matériau peut couler lentement (visqueux) et casser net quand on tire vite (élastique). C'est le pont vers le viscoélastique.
- Enfin le gel-cerveau (agarose 0,5–1 %) : on y mesurerait E par compression (poser des masses, mesurer l'écrasement) et μ par chute de bille ou amortissement.

Une fois le gel caractérisé, on le placerait dans une boîte rigide remplie d'eau — la boîte = le crâne, l'eau = le LCR — et on comparerait deux gestes : une translation pure puis une rotation, filmés au ralenti avec des traceurs (croix au feutre, billes) dans le gel.



Le modèle qui interprète tout ça est l'oscillateur amorti forcé : une masse m (le gel), un ressort de raideur k (la rigidité E), un amortisseur c (la viscosité μ). On ne refait pas la grosse simulation par ordinateur des laboratoires (modèles éléments finis DHIM, SIMon) — on la cite.

L'honnêteté, ici : de tout ce montage, on n'a tenté que le gel 3D, et il s'est effondré. Cette diapo présente donc le protocole conçu, pas des manip réussies. La diapo 5 dit franchement ce qui a cassé.

2.4.3 [?] Si le jury creuse

- « Pourquoi trois matériaux et pas un ? » → Pédagogie progressive : un liquide pur (μ seule), un viscoélastique évident (slime), puis le cas réel (gel). Chaque étape éclaire un morceau de la physique du cerveau.
 - « La boîte d'eau, à quoi ça sert ? » → Reproduire la situation réelle : le cerveau n'est pas collé au crâne, il baigne dans le LCR. L'eau autour du gel mime ce couplage fluide-structure (qualitativement seulement).
 - « Pourquoi un simple oscillateur suffit ? » → Parce qu'il capture l'essentiel — masse, rappel, frein — et qu'il prédit la résonance. On n'a pas besoin de la simulation complète pour comprendre *pourquoi* une fréquence amplifie. Niveau prépa = l'idée physique essentielle.
-

2.5 Diapo 5 — Problèmes rencontrés : notre modèle s'est effondré

2.5.1 [?] Ce que dit la diapo

Notre premier modèle s'est effondré. On avait fabriqué un cerveau en 3D en gélatine ; en 3D, elle n'a pas tenu sa forme et s'est affaissée. La cause, comprise après coup : on avait construit le modèle avant d'avoir mesuré les propriétés de la matière (E, μ). Plus une série d'autres pièges de mesure.

2.5.2 [?] Le topo développé

C'est la diapo de l'honnêteté, et c'est une force, pas une faiblesse. On raconte le vrai échec parce qu'il est instructif.

On a voulu fabriquer un cerveau en volume (3D) avec de la gélatine alimentaire. Ça ne s'est pas passé comme prévu : en 3D, la gélatine ne tient pas sa forme, et le modèle s'est complètement affaissé. En réfléchissant, on a compris pourquoi : on avait fabriqué le modèle sans avoir d'abord mesuré la rigidité et la viscosité de la matière. Sans ces nombres, impossible de la maîtriser. C'est exactement ce que notre professeure avait dit : caractériser la matière *avant* de modéliser. Cet échec a réorienté toute la démarche (diapo 6).

Au-delà de cet échec de départ, mesurer un gel mou et transparent qu'on secoue accumule d'autres difficultés réelles :

- Suivre la déformation d'un gel transparent : les traceurs sont bruités à la vidéo (reflets, fond chargé).
- Viscoélasticité : le module dépend de la vitesse de sollicitation — il faut mesurer vite *et* lentement.
- Loi de Stokes : valable seulement à petit nombre de Reynolds, $Re = \frac{2\rho_f r v}{\mu} < 1$ — sinon le μ trouvé est faux.
- Erreurs sur la chute de bille : température, paroi trop proche, vitesse limite non atteinte, bulles.
- Reproduire le gel : passer de 0,5 % à 1 % d'agarose change E d'un facteur ~ 2 .

- Imposer une rotation propre et répétable, et la distinguer d'une translation parasite — la prof elle-même a signalé ce point comme difficile.

Devant un jury, dire « cette mesure-là, on n'a pas pu la faire à temps » est plus solide que prétendre une fausse complétude. Un jury de TIPE valorise la lucidité sur la démarche.

2.5.3 Si le jury creuse

- « Pourquoi la gélatine 3D s'est-elle effondrée ? » → Trop molle pour son propre poids, et surtout non caractérisée : on ne connaissait ni son E ni sa prise. Un gel dont on n'a pas mesuré la rigidité, on ne peut pas le dimensionner.
- « Qu'est-ce que le nombre de Reynolds vient faire ici ? » → C'est le nombre qui dit si un écoulement est calme (laminaire) ou agité (turbulent). La loi de Stokes ne marche que si l'écoulement autour de la bille est calme, donc $Re < 1$. Au-delà, elle surestime la traînée et fausse μ . C'est une hypothèse qu'on doit vérifier, pas supposer.
- « Avez-vous au moins une mesure ? » → Réponse franche : non, l'expérience n'a pas abouti. Mais on sait *exactement pourquoi*, et on sait *comment on s'y prendrait* — c'est la diapo 6.

2.6 Diapo 6 — Solutions apportées : la démarche corrigée

2.6.1 Ce que dit la diapo

La leçon de l'échec, en deux gestes : caractériser la matière d'abord, modéliser ensuite ; et simplifier la géométrie (abandonner le 3D fragile). Plus une parade concrète pour chacun des pièges de la diapo 5. *Cette diapo dit ce qu'on ferait — pas des mesures réussies.*

2.6.2 Le topo développé

La parade principale vient de l'échec lui-même :

- Mesurer d'abord, modéliser ensuite. On caractériserait E et μ de chaque matériau avant de refaire le cerveau. Sans les nombres, pas de maîtrise.
- Simplifier la forme. Passer d'un 3D qui s'effondre à quelque chose de plus plat ou plus petit — une surface 2D, un volume réduit — qui tient et se filme proprement.

Puis, à chaque piège sa parade :

- Bruit du suivi vidéo → filmer au ralenti (slow-motion) et traiter les trajectoires en Python pour extraire la déformation malgré la transparence.
- Viscoélasticité → faire une double mesure, rapide *et* lente, et observer la relaxation : la contrainte qui retombe exponentiellement, $\sigma(t) = \sigma_0 e^{-t/\tau}$, donne un temps de relaxation τ (glossaire).

- Calibrer E et μ par deux mesures de support : la compression donne $E = \sigma/\varepsilon$ (pente initiale de la courbe contrainte-déformation); la chute de bille donne $\mu = \frac{2r^2(\rho_b - \rho_f)g}{9v}$, à température contrôlée.
- Rotation propre → mécaniser le lâcher : un axe et un angle imposés, répétés à l'identique, filmés au ralenti, pour comparer rotation et translation sur la même base.
- Interpréter → se ramener au modèle réduit masse-ressort-amortisseur pour lire le pic d'amplification sans refaire la simulation lourde.

À garder en tête à l'oral : cette diapo est au conditionnel (« on ferait », « on mesurerait »). Ce sont les corrections tirées de l'échec, pas des résultats. Ne pas glisser vers « on a mesuré ».

2.6.3 [?] Si le jury creuse

- « Pourquoi simplifier en 2D aiderait ? » → Une plaque ou un disque fin de gel tient son poids et se filme de face sans déformation parasite. Un cube 3D mou s'écrase sous lui-même et cache ses propres marqueurs.
- « Le décrétement logarithmique, c'est quoi ? » → Une astuce pour mesurer l'amortissement : on plante un bâtonnet dans le gel, on lui donne une chiquenaude, on filme les oscillations qui s'éteignent. La vitesse à laquelle l'amplitude diminue donne directement le frein c — et donc relie l'expérience à l'équation $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F$.
- « Pourquoi mécaniser le lâcher ? » → Pour la reproductibilité : à la main, chaque essai est un peu différent, et les points de la courbe partent dans tous les sens. Un dispositif qui lâche toujours depuis le même angle donne des essais comparables.

2.7 Diapo 7 — Résultats attendus : ce que le modèle prédit

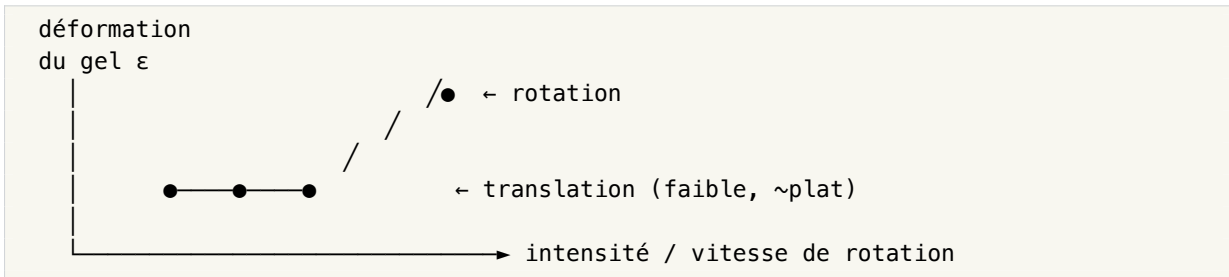
2.7.1 [?] Ce que dit la diapo

« Résultats attendus » = ce que le *modèle* prédit (le plan du prof l'autorise sans données mesurées). La courbe principale : à mouvement égal, la rotation déforme nettement plus que la translation, et l'écart grandit avec l'intensité. Une courbe secondaire : l'amplification en fréquence (la cloche de résonance). Le tout étiqueté sans ambiguïté « prédiction du modèle, non mesurée ».

2.7.2 [?] Le topo développé

C'est la diapo de la réponse, et c'est ici que l'honnêteté est non négociable.

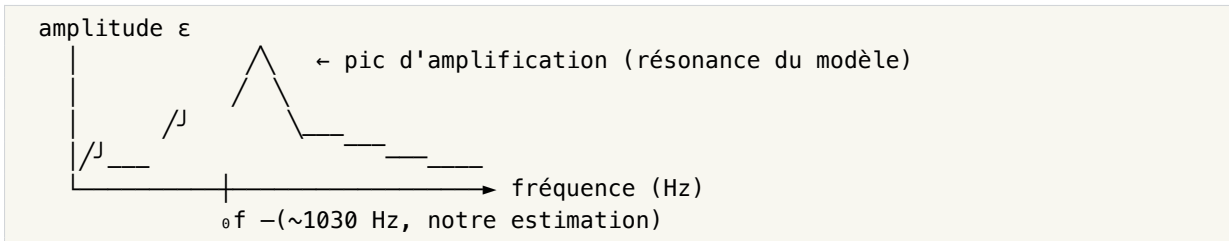
La courbe principale — déformation vs rotation. On trace la déformation interne du gel ε en fonction de l'intensité de la rotation. Deux séries : la rotation monte fort, la translation reste presque plate.



Lecture : à translation égale, la rotation déforme nettement plus — c'est exactement ce que pointe la littérature (Rowson et al. 2012) et ce que prédit notre oscillateur. Mais cette courbe n'est PAS nos données. Notre expérience n'a pas abouti ; c'est l'allure que la physique prévoit, pas une mesure. On le dit franchement.

La courbe secondaire — l'amplification en fréquence. C'est le tracé de l'équation de l'oscillateur :

$$A(\omega) = \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{c\omega}{m}\right)^2}}, \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad Q = \frac{\sqrt{km}}{c}.$$



Elle a la forme d'une cloche : l'amplitude grimpe vers un pic à la fréquence propre f_0 , puis redescend. Le facteur de qualité Q dit à quel point ce pic est aigu : moins le milieu amorti (petit c), plus le pic est pointu, plus l'amplification est forte (glossaire). C'est le tracé d'une équation, une allure théorique — pas une donnée, et surtout pas un chiffre lu dans un article.

La vérification d'ordre de grandeur (notre estimation, à dire avec une [?]) : avec $k \sim 6000 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ (ordre de grandeur tiré de Chakroun) et $m \sim 1,4 \text{ kg}$,

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{6000}{1,4}} \approx 10 \text{ Hz}.$$

Même *ordre de grandeur* que les $\sim 30 \text{ Hz}$ parfois cités ; l'écart vient des k et m effectifs et du confinement. On le présente comme une estimation à confronter à des mesures, pas comme une vérité.

La clôture, en miroir de la diapo 1 : on était partis de 1,6 à 3,8 millions de commotions dont on comprenait mal le mécanisme. Ce qu'on retient : un cerveau, parce qu'il est mou et confiné, se déforme surtout en rotation et amplifie certaines sollicitations. C'est ça, le danger invisible derrière le choc.

La règle d'or de cette diapo : chaque courbe porte une étiquette « prédiction du modèle / théorique, non mesurée ». Jamais « nos données », jamais « à remplir ». L'expérience a échoué — on assume : « nous n'avons pas pu mesurer ; voici ce que la physique prédit, et comment on s'y prendrait. »

2.7.3 ¶ Si le jury creuse

- « Cette courbe est mesurée ou théorique? » (LA question) → Théorique. Notre expérience n'a pas abouti, le gel s'est effondré, on n'a mesuré ni E , ni μ , ni cette courbe. C'est ce que prédit notre modèle d'oscillateur, et ce que confirme la littérature. On ne déguise rien en données.
 - « Comparer une rotation (rad/s^2) et une translation (g), n'est-ce pas comparer des choux et des carottes? » → Non : ce qu'on compare, c'est la déformation interne ε produite dans les deux cas. L'axe vertical est le même (la déformation, sans unité). C'est *lui* qui rend la comparaison légitime — la rotation produit plus de déformation parce qu'elle cisaille, la translation déplace en bloc.
 - « Pourquoi votre $f_0 \approx 10$ Hz et pas les 30 Hz cités? » → Parce que k et m sont des valeurs effectives (du modèle réduit), pas les vraies du cerveau entier, et le confinement change la raideur apparente. Même ordre de grandeur — c'est l'essentiel à ce niveau.
 - « Comment auriez-vous obtenu la vraie courbe? » → En mécanisant le lâcher (rotation reproductible), en mesurant la rotation par gyroscope (Phyphox) et par tracking vidéo de la boîte, et en mesurant la déformation par tracking des marqueurs internes. Deux instruments pour l'axe vital, pour ne dépendre d'aucun seul.
-

3 Partie B — Glossaire complet

Comment lire le glossaire. Chaque terme a trois lignes : Définition simple (le sens, en clair) · Image (une comparaison concrète à garder en tête) · Lien au sujet (pourquoi ça compte pour le cerveau). Les termes sont regroupés par famille, puis listés. Si un mot manque, c'est qu'il se réduit à un de ceux-ci.

3.1 Les matériaux : solide, fluide, et l'entre-deux

3.1.1 Module d'Young E

- Définition. Le nombre qui mesure la rigidité d'un solide : combien de contrainte il faut appliquer pour obtenir une déformation donnée. $E = \sigma/\varepsilon$. Unité : le pascal (Pa).
- Image. Deux élastiques : un fin (petit E , s'étire facilement) et un gros (grand E , dur à étirer). E grand = raide, E petit = mou.
- Lien au sujet. Le cerveau a $E \sim 0,1\text{--}10$ kPa : extrêmement mou, dans la zone de la gélatine, 10^7 fois plus mou que l'acier. C'est *la* raison pour laquelle un gel peut le modéliser.

3.1.2 Viscosité μ

- Définition. Le nombre qui mesure à quel point un fluide coule difficilement, c'est-à-dire sa résistance interne au glissement. Unité : le pascal-seconde ($Pa \cdot s$).
- Image. L'eau coule vite (faible μ), le miel coule lentement (grand μ), le goudron à peine (énorme μ).
- Lien au sujet. Le cerveau ne fait pas que se déformer comme un solide : il dissipe comme un fluide visqueux. μ (avec E) est l'un des deux nombres qu'on voulait mesurer.

3.1.3 Viscoélasticité

- Définition. La propriété d'un matériau qui est à la fois élastique (comme un ressort, il revient) et visqueux (comme un liquide, il dissipe et coule lentement). Ni solide pur, ni liquide pur.
- Image. Le silly-putty (pâte à rebondir) : tu le tires lentement, il s'étire comme du chewing-gum (visqueux); tu le tires d'un coup sec, il casse net (élastique). Le caramel mou, pareil.
- Lien au sujet. Le cerveau est viscoélastique. Sollicité lentement, il s'écoule; sollicité vite (un choc), il se comporte de façon rigide et fragile — c'est ce qui le rend vulnérable aux impacts rapides.

3.1.4 Contrainte σ (stress)

- Définition. La force étalée sur une surface : $\sigma = F/A$. C'est une pression. Unité : le pascal (Pa = N/m^2). C'est *ce qu'on impose* au matériau.
- Image. Marcher sur la neige avec des chaussures (petite surface, grande contrainte → on s'enfonce) ou avec des raquettes (grande surface, petite contrainte → on tient). Même poids, contrainte différente.
- Lien au sujet. Pour mesurer E du gel, on pose une masse connue sur une surface connue → on calcule σ .

3.1.5 Déformation ε (strain)

- Définition. De combien un objet change de forme, en proportion : $\varepsilon = \Delta h/h_0$ (variation de hauteur sur hauteur initiale). Sans unité (un pourcentage d'écrasement).
- Image. Un ressort de 10 cm comprimé à 9 cm : $\Delta h = 1$ cm, $\varepsilon = 1/10 = 0,1$, soit 10 % de déformation.
- Lien au sujet. C'est l'axe vertical de la courbe diapo 7 : la déformation interne du gel. C'est aussi ce qui lèse le tissu cérébral réel (un seuil de lésion $\varepsilon_c \approx 0,18$ est cité par Rowson).

3.1.6 Fluage (creep)

- Définition. La tendance d'un matériau à se déformer lentement sous une contrainte constante : on pose une charge et on ne bouge plus, mais l'objet continue de s'écraser doucement, pendant des minutes.
- Image. Un caramel mou posé sur la table qui s'étale tout seul avec le temps; une étagère chargée de livres qui s'affaisse au bout de quelques années.
- Lien au sujet. Le gel-cerveau flue : quand on pose une masse pour mesurer E , il faut attendre la stabilisation avant de lire l'écrasement, sinon le E est faussé.

3.1.7 Relaxation (de contrainte)

- Définition. L'inverse-miroir du fluage : on maintient une déformation constante et la contrainte retombe toute seule avec le temps, $\sigma(t) = \sigma_0 e^{-t/\tau}$.

- Image. Un élastique tendu et bloqué à une longueur fixe : au début il tire fort, puis sa tension mollit peu à peu sans qu'on le détende.
- Lien au sujet. Mesurer la vitesse de cette retombée donne le temps de relaxation τ , une signature directe du caractère viscoélastique du gel.

3.1.8 Temps de relaxation τ

- Définition. Le temps caractéristique de la retombée de contrainte (ou du retour élastique) : au bout de τ , il reste $\sim 37\%$ ($= 1/e$) de la contrainte de départ.
- Image. Le temps qu'un matelas mémoire de forme met à reprendre sa forme après qu'on s'est levé.
- Lien au sujet. τ relie l'expérience au modèle : il dépend de μ et de la raideur, donc le mesurer caractérise le matériau.

3.1.9 Nombre de Deborah De

- Définition. Le rapport entre le temps de relaxation du matériau et la durée de l'observation, $De = \tau/t_{obs}$. Il dit si le matériau se comporte plutôt liquide ($De \ll 1$, on le sollicite lentement) ou plutôt solide ($De \gg 1$, on le sollicite vite).
- Image. Le slime : étiré lentement il coule (De petit), tiré d'un coup il casse (De grand). Même matière, deux comportements selon la vitesse.
- Lien au sujet. C'est pourquoi un choc rapide rend le cerveau « rigide et fragile » : à grande vitesse de sollicitation, De est grand, le tissu réagit en solide cassant.

3.2 Les forces, les mouvements

3.2.1 Translation

- Définition. Un mouvement où tous les points se déplacent en ligne droite, ensemble, dans la même direction. Pas de rotation.
- Image. Une voiture qui freine net : ton corps part en avant en bloc.
- Lien au sujet. En translation, le cerveau bouge presque en bloc \rightarrow peu de déformation interne \rightarrow moins dangereux.

3.2.2 Rotation

- Définition. Un mouvement de pivot autour d'un axe : les points proches de l'axe bougent peu, ceux loin de l'axe bougent beaucoup.
- Image. Un carrousel : au centre tu tournes sur place, au bord tu files vite. Du coup, ce qui est entre les deux est cisailé.
- Lien au sujet. En rotation, centre et périphérie du cerveau se déplacent différemment \rightarrow cisaillement maximal \rightarrow c'est le mouvement le plus déformant, le cœur du TIPE.

3.2.3 Accélération linéaire (de translation)

- Définition. La variation de vitesse en ligne droite, $a = dv/dt$. Souvent exprimée en g (multiples de la pesanteur). Unité : m/s^2 .
- Image. Le coup de pied au démarrage d'un avion : la poussée dans le dos, c'est l'accélération linéaire.
- Lien au sujet. C'est l'« intensité » du choc en translation. Mesurée par l'accéléromètre du téléphone (Phyphox).

3.2.4 Accélération rotationnelle (angulaire) $\dot{\omega}$

- Définition. La variation de la vitesse de rotation dans le temps, $\dot{\omega} = d\omega/dt$. Unité : rad/s^2 . C'est « à quelle brutalité » la rotation démarre ou s'arrête.
- Image. Une toupie qu'on stoppe net avec le doigt : la vitesse de rotation chute en un instant → grande accélération angulaire.
- Lien au sujet. C'est l'axe horizontal de la courbe diapo 7 (effet rotation). La littérature montre que c'est elle, plus que l'accélération linéaire, qui prédit la commotion.

3.2.5 Cisaillement (shear)

- Définition. Une déformation où des couches voisines de matière glissent l'une sur l'autre, comme des cartes d'un jeu qu'on fait coulisser.
- Image. Un jeu de cartes posé à plat qu'on pousse en biais : le paquet se penche, chaque carte glisse un peu sur sa voisine.
- Lien au sujet. C'est le mode de déformation dangereux pour le cerveau. Un milieu mou résiste très mal au cisaillement ; la rotation en produit beaucoup, la translation peu.

3.2.6 Moment cinétique / couple

- Définition. Le couple est l'équivalent de la force pour les rotations (une force \times un bras de levier) ; le moment cinétique est l'équivalent de la quantité de mouvement pour les rotations (ce qui fait qu'une toupie « veut » continuer de tourner).
- Image. Une clé à molette : plus le manche est long (bras de levier), plus le couple est grand pour desserrer un boulon.
- Lien au sujet. Décrire la rotation de la tête → de la boîte → du gel passe par ces grandeurs (lois de Newton pour la rotation).

3.3 Les vibrations et la résonance

3.3.1 Oscillateur amorti forcé

- Définition. Le système modèle décrit par $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$: une masse m retenue par un ressort (raideur k), freinée par un amortisseur (coefficient c), et poussée par une force extérieure $F(t)$. « Amorti » = il y a un frein ; « forcé » = on le pousse de l'extérieur.

- Image. La suspension d'une voiture : la masse de la voiture (m), le ressort (k), l'amortisseur hydraulique (c), et les bosses de la route ($F(t)$).
- Lien au sujet. C'est le modèle central du TIPE. Le gel = la masse, sa rigidité = le ressort, sa viscosité = l'amortisseur, le choc = $F(t)$. Ce modèle prédit la résonance.

3.3.2 Les termes de l'équation $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$

- $m\ddot{x}$ — l'inertie. La masse qui résiste à être accélérée (\ddot{x} = accélération). Image : plus c'est lourd, plus c'est dur à faire démarrer.
- $c\dot{x}$ — le frein visqueux. Une force qui s'oppose à la vitesse (\dot{x}), proportionnelle à elle. Image : la main qu'on agite dans l'eau, freinée d'autant plus qu'on va vite. C'est l'amortissement, lié à μ .
- kx — le rappel élastique. Une force qui ramène vers l'équilibre, proportionnelle à l'écart x . Image : le ressort qui tire d'autant plus fort qu'on l'étire. Lié à E .
- $F(t)$ — l'excitation. Le coup qu'on donne de l'extérieur (le choc).

3.3.3 Fréquence propre f_0 (et ω_0)

- Définition. Le rythme naturel auquel un système oscille librement quand on le lâche : $f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{k/m}$ (en Hz). $\omega_0 = 2\pi f_0$ est la même chose en radians par seconde.
- Image. Une balançoire a un seul rythme naturel d'aller-retour, qui ne dépend pas de la force de la poussée mais de sa longueur. Un diapason a sa note.
- Lien au sujet. Notre estimation donne $f_0 \approx 10$ Hz (même ordre que les ~ 30 Hz cités). C'est la fréquence que le cerveau-modèle amplifie le plus.

3.3.4 Résonance

- Définition. Le phénomène par lequel, quand on excite un système à sa fréquence propre, l'amplitude des oscillations devient très grande — bien plus grande que l'excitation ne le suggérerait.
- Image. Pousser une balançoire au bon rythme : de petites poussées bien synchronisées \rightarrow grande amplitude. La cantatrice qui brise un verre en chantant sa note propre. Un pont qui se met à osciller dangereusement sous des pas cadencés.
- Lien au sujet. C'est l'idée physique centrale : il existe une fréquence où les sollicitations du cerveau sont amplifiées, donc où la déformation (et le danger) est maximale. La cloche de la diapo 7.

3.3.5 Facteur de qualité Q

- Définition. Le nombre qui dit à quel point le pic de résonance est aigu (et donc fort) : $Q = \sqrt{km}/c$. Grand Q = pic pointu et haut (peu d'amortissement); petit Q = pic mou et large (beaucoup d'amortissement).

- Image. Une cloche de bronze sonne longtemps et pur (grand Q); un oreiller frappé fait « pouf » et s'éteint aussitôt (petit Q).
- Lien au sujet. Moins le cerveau amortit (petit c), plus Q est grand, plus la résonance amplifie — donc plus le choc à la bonne fréquence est dangereux.

3.3.6 Amortissement c

- Définition. Le coefficient du frein dans l'oscillateur : la force de freinage vaut $c\dot{x}$, proportionnelle à la vitesse. Il dissipe l'énergie (la transforme en chaleur).
- Image. L'amortisseur d'une voiture qui empêche de rebondir indéfiniment après une bosse; un piston dans l'huile.
- Lien au sujet. C'est la trace de la viscosité dans le modèle. On le mesurerait par décrétement logarithmique (oscillations qui s'éteignent).

3.3.7 Oscillations amorties / décrétement logarithmique

- Définition. Des oscillations dont l'amplitude décroît à chaque cycle à cause de l'amortissement. Le décrétement logarithmique $\delta = \frac{1}{n} \ln(A_0/A_n)$ mesure cette décroissance et donne accès à c .
- Image. Une corde de guitare pincée : elle vibre fort, puis de moins en moins, jusqu'au silence. La vitesse de l'extinction renseigne sur le frein.
- Lien au sujet. C'est le pont expérimental vers l'équation : filmer les oscillations qui s'éteignent → mesurer c → relier au μ du gel.

3.4 Les fluides : Stokes, Reynolds, vitesse limite

3.4.1 Loi de Stokes

- Définition. La loi qui donne la force de frottement sur une petite bille qui tombe lentement dans un fluide visqueux : $F = 6\pi\mu rv$. En l'égalant au poids (moins la poussée), on en tire μ .
- Image. Une bille lâchée dans du miel : elle descend lentement et régulièrement, freinée par le miel.
- Lien au sujet. C'est notre méthode pour mesurer μ (du fluide newtonien, et du gel) — chronométrer une chute de bille.

3.4.2 Nombre de Reynolds Re

- Définition. Le nombre sans unité qui dit si un écoulement est calme (laminaire, Re petit) ou agité (turbulent, Re grand) : $Re = \rho_f v d/\mu$. Compare l'inertie du fluide à sa viscosité.
- Image. De la fumée de bougie : d'abord un filet régulier qui monte droit (Re petit), puis qui se met à tourbillonner plus haut (Re grand).
- Lien au sujet. La loi de Stokes n'est valable que si $Re < 1$. Le vérifier (et l'afficher) est un point fort face au jury : « avez-vous vérifié votre hypothèse ? Oui, $Re \approx 0,0X$. »

3.4.3 Vitesse limite (terminale)

- Définition. La vitesse constante qu'atteint un objet en chute dans un fluide quand le frottement équilibre exactement le poids — l'objet ne va alors plus vite.
- Image. Un parachutiste : après quelques secondes, il ne s'accélère plus, il descend à vitesse constante. Une bille dans le miel l'atteint très vite.
- Lien au sujet. C'est cette vitesse-là qu'on mesure dans la chute de bille (entre deux repères) pour calculer μ . Piège : si le tube est trop court, elle n'est pas atteinte $\rightarrow \mu$ faux.

3.4.4 Fluide newtonien

- Définition. Un fluide dont la viscosité μ est constante, quelle que soit la vitesse à laquelle on le sollicite.
- Image. L'eau, l'huile, la glycérine : ça coule pareil qu'on aille doucement ou vite.
- Lien au sujet. C'est le cas étalon (la glycérine a un μ tabulé) qui sert à vérifier que la méthode de chute de bille marche, avant de l'appliquer au gel.

3.4.5 Fluide complexe / non-newtonien

- Définition. Un fluide dont la viscosité change selon la vitesse de sollicitation (ou qui mélange comportement liquide et solide).
- Image. Le slime, le ketchup (qui ne coule qu'une fois secoué), le mélange Maïzena-eau (dur sous un coup, liquide au repos).
- Lien au sujet. Le slime fait le pont entre le fluide pur et le viscoélastique : il montre qu'un même matériau peut couler *et* casser selon la vitesse.

3.5 L'anatomie et la mesure

3.5.1 Liquide céphalo-rachidien (LCR)

- Définition. Le liquide clair qui entoure et baigne le cerveau et la moelle épinière, entre le cerveau et le crâne.
- Image. Le cerveau surnage dedans comme un objet dans un bocal d'eau — ça l'amortit et le porte.
- Lien au sujet. Dans la maquette, c'est l'eau autour du gel dans la boîte. Il couple le mouvement du cerveau à celui du crâne (qualitativement) et explique en partie le mouvement relatif lors d'un choc.

3.5.2 Couplage fluide–structure

- Définition. L'interaction mutuelle entre un solide (ou un gel) et le fluide qui l'entoure : le fluide pousse le solide, le solide remue le fluide, et les deux s'influencent.
- Image. Un poisson dans un sac d'eau qu'on secoue : l'eau ballote le poisson, le poisson brasse l'eau.

- Lien au sujet. Cerveau + LCR = couplage fluide–structure. Dans la maquette on le reproduit qualitativement (gel + eau), sans le chiffrer.

3.5.3 Gyroscope / accéléromètre (Phyphox)

- Définition. Deux capteurs présents dans tout smartphone. L'accéléromètre mesure l'accélération linéaire (m/s^2); le gyroscope mesure la vitesse de rotation (rad/s). Phyphox est l'application gratuite qui les enregistre.
- Image. Ce sont les capteurs qui font tourner l'écran quand tu inclines le téléphone, ou qui comptent tes pas.
- Lien au sujet. C'est l'instrument qui mesurerait l'intensité du choc : l'accéléromètre pour la translation, le gyroscope pour la rotation (et son accélération angulaire $\dot{\omega}$, l'axe X de la diapo 7).

3.5.4 Tracking vidéo (Tracker)

- Définition. Suivre image par image la position de marqueurs sur une vidéo au ralenti pour mesurer des déplacements et des déformations. Tracker est le logiciel gratuit qui le fait.
- Image. Comme entourer au feutre la balle sur chaque photo d'une rafale pour reconstituer sa trajectoire.
- Lien au sujet. C'est ce qui mesurerait la déformation ε du gel (l'axe Y de la diapo 7), en suivant les croix/billes dans le gel.

3.5.5 Module éléments finis (DHIM, SIMon)

- Définition. De grosses simulations par ordinateur qui découpent le cerveau en des milliers de petits morceaux pour calculer sa déformation lors d'un choc.
- Image. Comme un pixel-art en 3D du cerveau, où l'ordinateur calcule comment chaque petit cube se déforme.
- Lien au sujet. On cite ces modèles (ils concluent comme nous : la rotation déforme plus que la translation) — on ne les refait pas (hors niveau prépa).

3.6 Les unités, en un coup d'œil

- Pascal (Pa) : unité de pression / contrainte / module (E). $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}/m^2$. Le cerveau : milliers de Pa (kPa). L'acier : milliards (GPa).
- Pascal-seconde ($Pa \cdot s$) : unité de viscosité μ . Eau $\approx 0,001$; glycérine $\approx 1,5$; miel ≈ 10 .
- Hertz (Hz) : unité de fréquence, nombre d'oscillations par seconde. Notre $f_0 \approx 10 \text{ Hz}$.
- Sans unité : la déformation ε , le nombre de Reynolds Re , le facteur de qualité Q , le nombre de Deborah De — ce sont des rapports.

En une phrase, ce que ce carnet vous donne. Pour chaque diapo, de quoi *comprendre* avant de *réciter*; et pour chaque mot, une image à garder en tête quand le jury creuse. La présentation montre l'idée; ce carnet vous permet de la tenir — y compris la partie la plus difficile à dire : « *l'expérience n'a pas abouti, et voici exactement ce qu'on a compris.* » C'est cette honnêteté-là, bien armée de physique, qui convainc un jury.