

ÉTUDE DES SÉISMES AU COLLÈGE

Modèles analogiques des séismes : de la rupture au glissement

Alain Le Métayer

lemetayeralain@ik.me

2026

AVERTISSEMENTS

Dans ce dossier, je critique des **modèles analogiques**, pas les enseignants qui les utilisent. Les professeurs ont de **bonnes raisons** de choisir les modèles de rupture, aujourd'hui les plus utilisés : ils sont simples, spectaculaires, efficaces et cohérents avec les programmes en vigueur.

Mon intention n'est pas de limiter la liberté pédagogique, mais d'élargir les options disponibles en présentant d'autres modèles ainsi que mon analyse critique.

Je ne discute pas ici de ce que les enseignants feront de ces modèles en classe : je me limite à l'analyse des dispositifs eux-mêmes.

Remerciements pour la mise au point des modèles analogiques

Mes remerciements vont tout particulièrement à Stéphane Dominguez dont les conseils m'ont été précieux. Il m'a généreusement accordé beaucoup de son temps. Je remercie également pour leurs avis et leurs conseils : Éric Beucler, Michel Campillo, Yannick Caniven et Maxime Henriquet.

Les personnes ici remerciées ne peuvent en aucun cas être tenues pour responsables des propos, analyses ou positions défendues dans ce travail, dont je suis l'unique auteur et responsable.

Résumé

L'explication d'un phénomène géologique complexe, comme les séismes peut s'appuyer sur l'utilisation de modèles analogiques. Ce dossier présente six modèles analogiques et propose une analyse critique qui permet d'évaluer leur cohérence avec les connaissances scientifiques et leur pertinence. Cette dernière notion est définie comme étant, pour un élève, le rapport entre le gain cognitif (informations acquises) et le coût cognitif (effort requis).

Les modèles analogiques basés sur la rupture d'un objet (plaque, baguette, etc.) sont, de loin, les plus utilisés dans les classes. Ces modèles sont probablement choisis pour leur simplicité et parce qu'ils illustrent parfaitement la déformation élastique et la rupture brusque et imprévisible. Pourtant, ils présentent une limite majeure : il n'y a pas de glissement frictionnel, qui est à l'origine de l'essentiel des ondes sismiques. Cette absence n'est pas en accord avec les connaissances scientifiques et par conséquent, diminue fortement leur pertinence. Ces modèles de rupture sont en accord avec les programmes.

Paradoxalement, les modèles classiques de type patin-ressort et les modèles à plaques de mousse élastiques sont rarement choisis, alors que conception et leur utilisation en classe est simple. De plus, leur fonctionnement rend compte du glissement frictionnel. Cette caractéristique leur confère une pertinence supérieure. Ces modèles présentent eux aussi des limites, dont l'absence de rupture !

En conclusion, ce travail suggère qu'une évolution des pratiques pédagogiques est souhaitable. Faire le choix des modèles à glissement frictionnel constitue une piste pédagogique pertinente pour améliorer la compréhension des mécanismes sismiques.

😊 Résumé 😊

LA MODÉLISATION DES SÉISMES

selon les profs



selon les sismologues



analogies
fonctionnelles

capacité
explicative

capacité
prédictive

caractéristiques des
séismes:
éléments
relations
événements

analogies
structurelles

propriété
mécaniques

PERTINENCE

gain cognitif (informations nouvelles)

coût cognitif (effort de traitement requis)



SOMMAIRE

Avertissements	1
Remerciements	2
Résumé	2
Résumé 😊	3
Sommaire	4
Partie 1 : L'état actuel des connaissances sur l'origine des séismes (niveau collège)	5
1. Choisir un modèle analogique requiert une connaissance minimale des processus sismiques. Ce que ce dossier ne dit pas.	5
2. Quelques sources fiables et accessibles qui permettent de mettre à jour ses connaissances.	7
3. Liste des caractéristiques susceptibles d'être retenues pour la conception d'un modèle analogique	11
Partie 2 : Les modèles analogiques des séismes utilisés dans les collèges	12
1. Quel modèle analogique utilisez-vous ?	12
2. Les modèles analogiques présentés dans des vidéos dédiées.	13
3. L'origine des séismes selon les programmes officiels	15
Partie 3 : Présentation de six modèles analogiques	17
1. Les modèles de rupture	17
2. Les modèles de glissement frictionnel	17
2.1. Les modèles patin-ressort	17
2.2. Les modèles à plaques de mousse	17
3. Concepts physiques prérequis	19
3.1. Les comportements mécaniques des matériaux	19
3.2. Le concept d'énergie	19
4. Critères retenus pour l'évaluation des modèles	21
4.1. La pertinence	21
4.2. Les analogies structurelles et fonctionnelles	21
4.3. La capacité explicative et prédictive	22
A Le modèle de rupture d'une plaque de lasagnes	23
B Le modèle patin-ressort horizontal	27
C Le modèle patin-ressort à faille décrochante et à faille inverse	30
D Le modèle à plaques de mousse – version simple	34
E Le modèle à plaques de mousse – version complexe	37
Conclusion	40
ANNEXE	
1. Comparaison des sismogrammes réels est des "sismogrammes" des modèles	42
2. Fixation des capteurs piézoélectriques	43
3. Exemple du séisme de Mandalay du 28 mars 2025	44

Partie 1 : L'état actuel des connaissances sur l'origine des séismes (niveau collège)

1. Choisir un modèle analogique requiert une connaissance minimale des processus sismiques.

« Est-il nécessaire qu'un simulacre (c'est-à-dire une représentation concrète réussie d'un objet) ressemble à l'objet qu'il représente ? Sans aucun doute, car, dans le cas contraire, le simulacre ne serait pas considéré comme tel : il ne pourrait en aucun cas prendre la place de l'original. Cependant, cette ressemblance n'est requise que pour les aspects que l'on souhaite imiter. Par exemple, le plan d'une maison doit respecter les positions relatives des pièces de la maison, et le modèle de boules-bâtonnets qui représente une molécule doit respecter la géométrie des liaisons moléculaires. »

Mario BUNGE (2025) *Sémantique I*, Éditions Matériologiques, traduction de Stéphane Salmons, p. 141.

Pour choisir « les aspects que l'on souhaite imiter », il est nécessaire de s'informer sur l'état actuel des connaissances scientifiques concernant l'objet réel étudié et d'établir une liste des caractéristiques du système : éléments, relations, événements, propriétés physiques, etc. Le choix des caractéristiques du réel à conserver dans le modèle est fortement limité a priori par le niveau du public concerné. L'enseignant doit donc opérer un choix : quel que soit le nombre de caractéristiques retenues, le modèle doit atteindre une pertinence optimale (voir l'encadré *La pertinence*), c'est-à-dire permettre à l'élève d'obtenir un maximum d'informations nouvelles et vraies (gain cognitif) pour un minimum d'effort métareprésentationnel (coût cognitif). Le fait que les informations nouvelles soient vraies, c'est-à-dire en cohérence avec les connaissances scientifiques, rend le gain cognitif durable. Un gain cognitif durable veut dire que l'élève enrichit son encyclopédie mentale. En revanche, la pertinence ne dit rien de la richesse informationnelle du modèle, c'est-à-dire du nombre de caractéristiques du système réel qu'il est capable d'intégrer.

Cette distinction entre richesse et pertinence fait qu'il existe une tension entre la recherche d'un nombre élevé d'« aspects que l'on souhaite imiter » et celle d'une pertinence élevée. Cette opposition conduit souvent à un arbitrage : réduire la richesse du modèle pour tenter d'en augmenter la pertinence, c'est-à-dire choisir un modèle simple mais pertinent.

La pertinence

Dans le cadre de la théorie de la pertinence de Dan Sperber et Deidre Wilson, celle-ci est définie comme le rapport entre le gain cognitif obtenu et le coût cognitif requis. Le gain cognitif correspond à l'acquisition d'informations nouvelles, la confirmation ou l'élimination d'hypothèses. Un coût cognitif est un effort inférentiel et la recherche dans l'encyclopédie mentale de l'individu des connaissances pertinentes. Cette encyclopédie mentale représente sa vision globale du monde.

Dan Sperber et Deidre Wilson (1989) *La pertinence*, Éditions de minuit

Toutefois, un moyen d'augmenter simultanément la pertinence et la richesse consiste à respecter des analogies de structure (éléments et relations) et de fonctionnement (événements et processus). Si ces analogies sont faibles, l'élève devra construire lui-même un modèle abstrait pour établir les correspondances entre le modèle et le réel, ce qui représente un coût cognitif supplémentaire à ne pas négliger.

Il est donc raisonnable de viser à la fois un modèle pertinent et riche. Si cet objectif est atteint, la capacité explicative et prédictive du modèle s'en trouvera augmentée.

Avant d'aborder cette question difficile, il est nécessaire de faire le point sur les connaissances scientifiques liées aux séismes (partie 1), sur les pratiques des professeurs de SVT (partie 2), puis de présenter les différents modèles analogiques existants (partie 3).



2. Quelques sources fiables et accessibles qui permettent de mettre à jour ses connaissances.

J'ai limité les sources à quatre livres de vulgarisation écrits par des sismologues et géophysiciens ainsi que deux sites.



Pascal Bernard (2009) in 29 notions clés pour savourer et faire savourer la science : Primaire et collège, Le Pommier <https://urls.fr/r0ZK-D>

Ce livre est destiné aux professeurs des écoles et des collèges, il contient un chapitre de 19 pages intitulé "les séismes".

Rémy Bossu, Jocelyn Guilbert et Bruno Feignier (2016) Où sera le prochain séisme ? EDP Sciences

Louis et Hélène Géli (2012) Un crapaud peut-il détecter un séisme ?, Quæ

Pascal Bernard (2017) Pourquoi la Terre tremble, Belin

Ce livre est beaucoup plus complet, les aspects historiques sont développés et rendent sa lecture passionnante.

Voici quelques extraits qui décrivent les processus sismiques.

Bernard (2009)

« À l'origine d'un séisme, il y a donc la rupture brutale des aspérités qui bloquent une faille préexistante, suivie immédiatement du glissement rapide des blocs de part et d'autre. [...] Les séismes tectoniques sont donc liés à la résistance des aspérités des surfaces des failles [...] La sismicité des failles est donc plus une question de frottement sur une surface fragile que de rupture proprement dite [...] » p 75

Bossu, Guilbert et Feignier (2016)

« Un séisme, ou tremblement de terre, est le résultat du glissement brutal de deux masses rocheuses l'une par rapport à l'autre le long d'une faille » p. 15 « L'hypocentre est le point où la rupture a débuté sur la faille. » p. 16 « Le plan de faille correspond à la portion de la faille sur laquelle se fait le glissement au cours d'un séisme donné. » p. 17 « Lors d'un séisme, le frottement des deux masses rocheuses génère de la chaleur et des vibrations qui se propagent dans la Terre dans toutes les directions. Ces vibrations sont des ondes sismiques. » p. 20 « Ces déplacements déforment à

grande échelle la masse rocheuse, et la faille étant bloquée, la masse rocheuse se charge en énergie élastique, exactement comme un ressort que l'on comprime. Lorsque la résistance à la rupture sur la faille est atteinte, le séisme survient relâchant tout ou partie de l'énergie élastique emmagasinée. Les mesures de part et d'autre de la faille indiquent alors le glissement cosismique. » p. 23

Géli (2012)

« [...] **plus de 95 % des séismes se passent aux limites de ces plaques.** » p. 12 « **Certains séismes se produisent à l'intérieur des plaques. [...] C'est là, dans ces anciennes zones de rupture (qui sont aussi des zones de fragilité) que se situent ces failles cachées.** » p. 13 « Plus proche de nous, le sud de la Bretagne ou la Vendée, par exemple, sont des zones sismiquement actives avec des séismes de magnitude 5, alors même qu'elles ne sont ni l'une ni l'autre en bordure de plaque ! La raison est simplement qu'il existe ici de nombreuses failles très anciennes qui sont réactivées régulièrement (la faille sud-armoricaine notamment) malgré les faibles contraintes. » p. 14 « Contrairement aux autres risques naturels, les tremblements de terre sont aujourd'hui impossibles à prévoir à court terme en raison de la complexité des phénomènes à prendre en compte. [...] Un objectif encore considéré comme irréaliste par la quasi-totalité des sismologues. » p. 51

Bernard (2017)

« L'idée des expérimentateurs est simple : **les séismes ont surtout lieu sur des failles préexistantes et créent peu de fractures « fraîches » au sein de la roche.** Le processus de rupture sismique, et les phénomènes qui le précèdent, doivent donc être liés à des problèmes de glissement et de frottement, et non pas à des problèmes de fracturation massive. » « Les avantages de ce modèle de frottement sur le modèle de fracturation sont multiples. **En effet, il semble plus facile – pour l'expérimentateur - et plus réaliste – pour le sismologue – de faire glisser une fracture préexistante que de fracturer un bloc intact.** » « À l'échelle de la croûte terrestre, on a montré que la zone de glissement potentiellement instable sur les failles était confinée à des profondeurs entre quelques kilomètres et une quinzaine de kilomètres de profondeur. **Cette zone favorable au glissement instable est précisément celle des séismes.** Plus profondes, les roches sont trop chaudes ; elles deviennent plastiques, et stabilisent le glissement. Au-dessus, près de la surface terrestre, les roches ne sont pas assez comprimées ; le frottement y est donc réduit, et les failles glissent lentement, relaxant les contraintes. » pp. 202-205

GÉORISQUES

« Lorsque le frottement entre les blocs de part et d'autre d'une de ces failles est important, le mouvement est empêché. De l'énergie s'accumule le long de la faille. Lorsque l'énergie accumulée permet de surmonter l'effet du frottement, **le retard du mouvement se traduit par un déplacement instantané entre blocs qui est la cause des séismes.** »

<https://www.georisques.gouv.fr/consulter-les-dossiers-thematiques/s%C3%A9ismes>

(consulté le 15 février 2026)

LES ANALES DES MINES

Génération des ondes sismiques

« **Ce mouvement brutal, en sens opposé, des deux blocs de part et d'autre d'une faille est la source des ondes sismiques.** Ces dernières vont se propager loin de la faille, dans toutes les directions, grâce à l'élasticité des roches. Des ondes de compression (ondes P) les plus rapides, à 6 km/s dans la croûte terrestre, suivies des ondes de cisaillement (ondes S), deux fois plus lentes, mais de plus forte amplitude. [...] **Le glissement sur la faille provoque, outre les ondes sismiques,** une déformation et un champ de déplacement permanent des roches autour de la faille rompue. Mais alors que l'amplitude des ondes sismiques diminue lentement avec la distance en inverse de la distance, le déplacement statique final décroît bien plus vite au carré de la distance. Les déformations statiques associées sont donc très concentrées près de la faille, leur décroissance étant au cube de la distance : passez de 10 km à 100 km de la faille, la déformation est divisée par mille. »

<https://www.annales.org/re/2006/re41/bernard.pdf> (consulté le 15 février 2026)

Résumé :

1. Les séismes sont, dans leur immense majorité, générés sur des **failles préexistantes aux limites des plaques** ou sur des anciennes failles intraplaques.
2. Des **aspérités** empêchent le mouvement libre d'une plaque par rapport à l'autre : **la faille est bloquée.**
3. La **déformation élastique** des roches de part et d'autre de la faille correspond à une **accumulation d'énergie potentielle élastique.**
4. Quand le seuil de résistance des roches est dépassé, il y a une **rupture qui se propage rapidement à partir du foyer**
5. puis un **glissement frictionnel** des deux compartiments de roches le long du plan de faille.
6. C'est **principalement le glissement (et non la rupture) qui convertit l'énergie potentielle élastique sous forme thermique, radiative et mécanique (fracturation).**
7. Les séismes sont **imprévisibles** à court terme.

Ce résumé repose en partie sur la théorie du rebond élastique (G. K. Gilbert, 1884), dont le cycle sismique est l'unité temporelle. Les schémas ci-dessous résument les étapes

d'un cycle sismique. Les réajustements post-sismiques et la transition fragile-ductile ne seront pas abordés.

Figure A.

Le plan de faille correspond à la surface de contact des deux plaques.

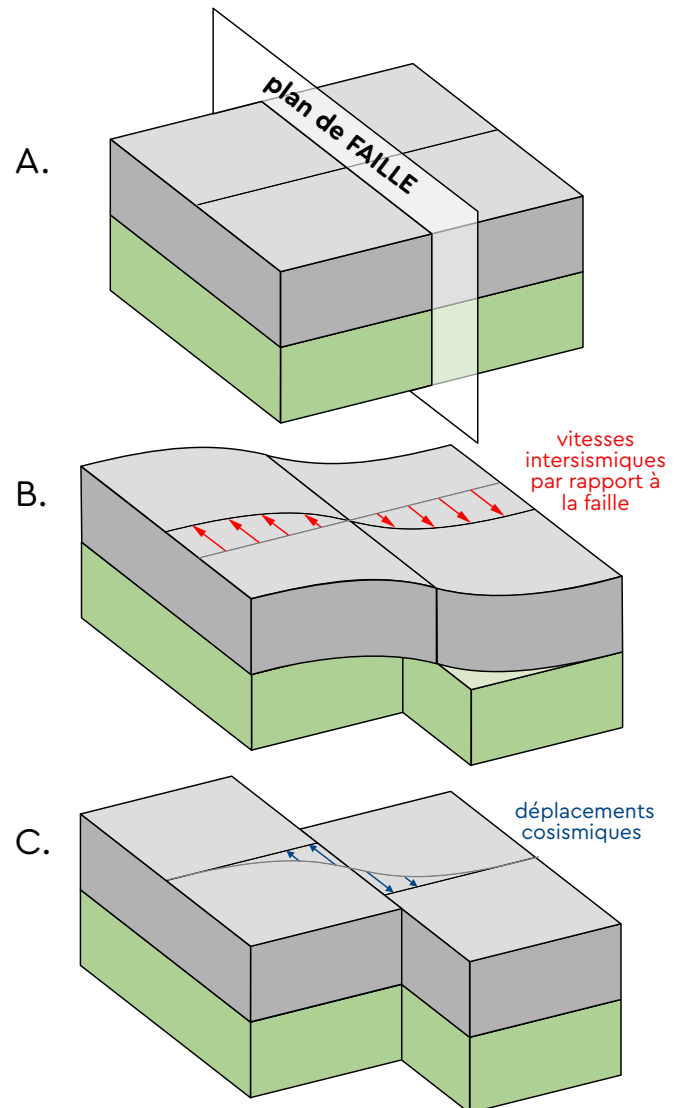
Figure B.

Les plaques sont bloquées au niveau de la faille, mais leur mouvement lent entraîne une déformation élastique des roches.

Les vitesses de déplacement par rapport à la faille augmentent avec la distance à la faille.

Figure C.

Lorsque les contraintes dépassent le seuil de rupture des roches, les plaques glissent rapidement le long du plan de faille. Ce glissement convertit l'énergie potentielle élastique accumulée pendant la période intersismique en énergie thermique, radiative (ondes sismiques) et de fracturation.



Remarque :

Il faut garder à l'esprit que le cycle sismique est une simplification de la réalité.

3. Liste des caractéristiques susceptibles d'être retenues pour la conception d'un modèle analogique

Éléments :

1. Deux compartiments rocheux (plaques).

Propriétés mécaniques des roches :

2. Comportement élastique puis cassant au-delà de la limite de rupture.

Relations structurelles :

3. Les deux plaques sont comprimées l'une contre l'autre.
4. La surface de contact des plaques définit le plan de faille.

Événements :

5. Les deux plaques mobiles sont bloquées au niveau de la faille.
6. Le mouvement horizontal et lent des plaques impose une déformation élastique des roches de part et d'autre de la faille. Les roches accumulent de l'énergie potentielle élastique.
7. La rupture se propage à partir du foyer...
8. produit des ondes sismiques et...
9. permet le glissement frictionnel rapide des deux plaques.
10. Ce mouvement rapide entraîne la conversion d'une partie de l'énergie potentielle élastique accumulée en énergie thermique, énergie radiative (ondes sismiques) et énergie de fracturation. C'est ce glissement qui produit l'essentiel des ondes sismiques.
11. Cycle sismique.
12. Imprévisibilité.

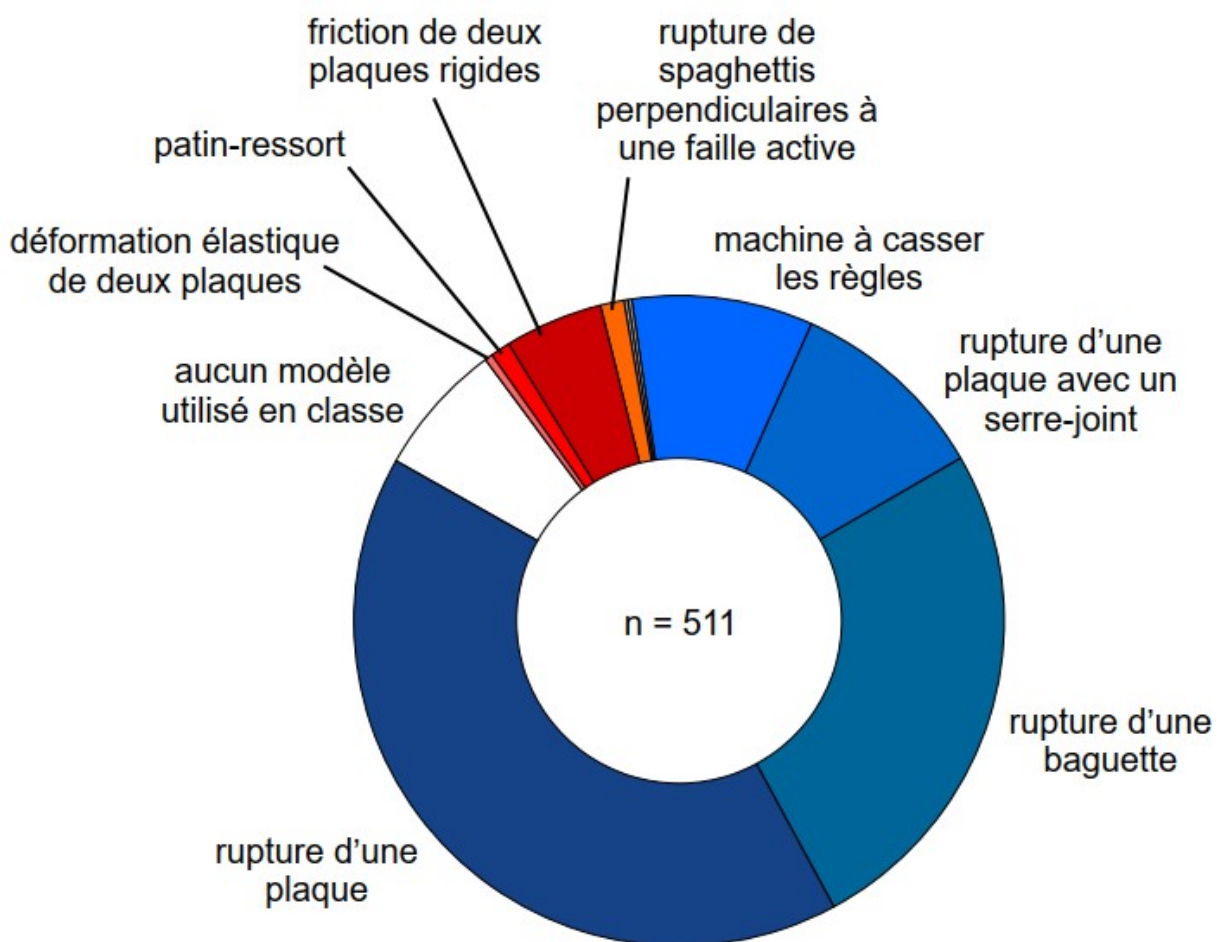
Partie 2 : Les modèles analogiques des séismes utilisés dans les collèges

1. Quel modèle analogique des séismes utilisez-vous ?

J'ai réalisé un sondage sur un échantillon de 511 professeurs de SVT qui montre que les modèles de **rupture** d'un objet sont les plus utilisés en classe (93 %) par rapport aux modèles de **glissement frictionnel** de deux compartiments séparés par un plan de faille.

Le succès des modèles de rupture n'est pas le fruit du hasard, il le doit probablement à sa simplicité matérielle et opérationnelle. Pour autant, est-il cohérent avec les connaissances scientifiques ? Les modèles de glissement frictionnel sont peu utilisés en raison de leur complexité, de leur manque de visibilité ?

Le but de ce dossier est d'éventuellement faire changer vos pratiques en vous présentant six modèles. À vous de choisir celui qui vous paraît le plus pertinent !



2. Les modèles analogiques présentés dans des vidéos dédiées

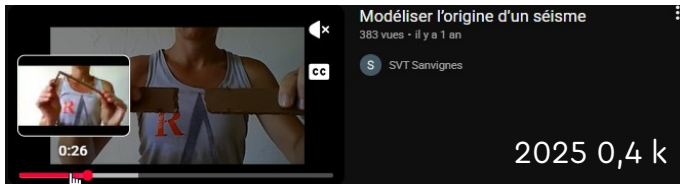
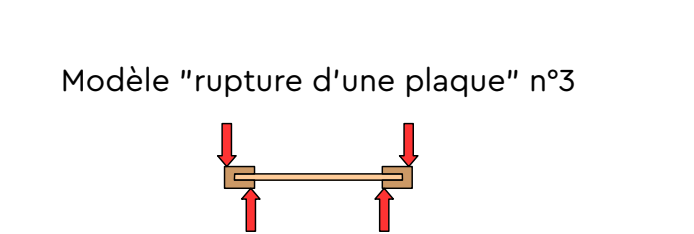
Les modèles analogiques peuvent être utilisés directement en classe ou présentés sous forme de vidéos. Sur YouTube, seules les vidéos réalisées par des enseignants de SVT et entièrement consacrées à un modèle analogique ont été retenues, toutes les autres ont été écartées.

L'offre de vidéos présentant des modèles analogiques est quasi exclusivement limitée aux modèles de rupture d'un matériau homogène : règle ou plaquette en plastique, polystyrène et polyuréthane.

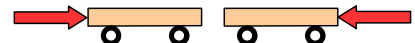
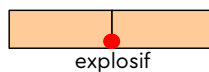
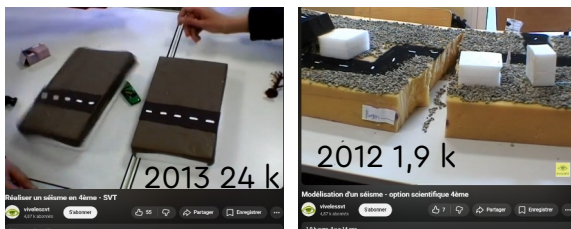
La vidéo de la "machine à casser des règles", avec 66 000 vues, est la plus regardée.

Il n'existe à ma connaissance que deux vidéos de modèles constitués de deux plaques de mousse. Je n'ai pas trouvé de vidéo montrant un modèle patin-ressort.

	Modélisation d'un séisme - La machine à "casser les règles" 66 k vues · il y a 15 ans sylv12 Modélisation du point de rupture des roches en profondeur lors d'un séisme. On applique sur la règle une force orientée ... 2011 66 k	Modèle "rupture d'une plaque" n°1
	Modélisation de l'origine des ondes sismiques 8,4 k vues · il y a 10 ans SV Terry Question : Comment se forment les vibrations à l'origine d'un séisme ? Hypothèse : les vibrations du sol sont dues au ... 2016 8,4 k	
	Modélisation d'un séisme - septembre 2019 2,1 k vues · il y a 6 ans Seb Gero Modélisation d'un séisme. 2020 2,1 k	Modélisation séisme 2 - année 2019 1 k vues · il y a 6 ans Seb Gero Modélisation séisme 2 - année 2019. 2020 1 k
	Modélisation de la rupture d'une roche TPE séismes 2015 193 vues · il y a 7 ans Kurara Chan 2019 0,2 k	Protocole expérimental Capteur d'ondes relié à l'ordinateur Serre-joint Plaquette de polystyrène Support en bois MODÉLISATION ONDES SISMQUES AUDACITY 4ème 5,7 k vues · il y a 5 ans Mexpescie Modélisation pour comprendre l'origine des ondes sismiques. Le matériel utilisé est : une plaquette de polystyrène (modélisant les ... 2021 5,7 k
	Un modèle pour comprendre l'origine des séismes 593 vues · il y a 7 ans Samuifm Il s'agit d'une manip pour modéliser la rupture des roches à l'origine d'un séisme ainsi que l'enregistrement des ondes sismiques. 2019 0,6 k	maquette séisme 4,9 k vues · il y a 12 ans VERONIQUE MULTARI 2014 4,9 k
	SVT 4e - modèle séisme 2,1 k vues · il y a 9 ans M. Soulat Modélisation de l'origine d'un séisme grâce au modèle Jeulin et à l'utilisation de capteurs d'ondes reliés au logiciel Audacity. 2017 2,1 k	SVT4e - Modélisation de la formation d'un séisme 974 vues · il y a 9 ans SVT Gautier 3. Cassure / Formation de la faille 2017 1 k



Modèles "originaux"



3. L'origine des séismes selon les programmes officiels

2005

Programmes de l'enseignement de SVT pour les classes de cinquième et de quatrième (juillet 2005)

« Les séismes sont mis en relation avec une **libération d'énergie** ; des forces s'exerçant en permanence sur les roches conduisent à **une accumulation d'énergie qui finit par provoquer leur rupture soudaine, à l'origine d'une faille ou de sa réactivation.** » p2

« Des contraintes s'exerçant en permanence sur les roches conduisent à **une accumulation d'énergie qui finit par provoquer leur rupture au niveau d'une faille : le foyer du séisme est le lieu où se produit la rupture ; à partir du foyer, la déformation se propage sous forme d'ondes sismiques enregistrables.** » p9

2006

Classe de quatrième Sciences de la vie et de la Terre ; Programme commenté Projet de document d'accompagnement (octobre 2006)

« Les séismes

Lors de l'étude d'un séisme, on cherche à expliquer la cause des manifestations observées en surface : dégâts aux constructions, modifications de paysage, apparition de faille. Il s'agit d'établir l'origine profonde d'un séisme et **d'attribuer les dégâts causés en surface à la propagation d'ondes sismiques nées au moment de la rupture au niveau du foyer.** La nature **des ondes** ne pouvant être définie précisément, on se limitera à considérer qu'il s'agit de vibrations enregistrables grâce à des sismographes (dont seul le principe de fonctionnement est abordé) et **responsables des déformations en surface.** L'étude d'un sismogramme enregistré en un point distant du foyer permet d'établir l'idée de la propagation de ces ondes dans le globe terrestre. Il peut être commode de recourir à une analogie pour montrer la propagation d'ondes dans un solide ; la transmission d'ondes dans un solide donne une meilleure image des ondes sismiques que la propagation d'ondes dans un liquide. **La notion d'énergie et sa libération brutale à l'origine du séisme peuvent être amenées par la modélisation et illustrées par la magnitude d'un séisme et son équivalence en quantité d'énergie libérée.** » p. 14

2008

B.O. spécial n°6 août 2008

« Des **contraintes** s'exerçant en permanence sur les roches conduisent à **une accumulation d'énergie qui finit par provoquer leur rupture. Le foyer du séisme est le lieu où se produit la rupture. A partir du foyer, la déformation se propage sous forme d'ondes sismiques.** » p. 24

2016

Ressources 2016 SVT Mettre en œuvre son enseignement (mars 2016)

« **associer faille, séisme et mouvements de blocs rocheux** et expliquer qu'ils témoignent de **l'accumulation de tensions liées au mouvement des plaques lithosphériques.** » p4

2020

Programme cycle 4 Rentrée 2020 D'après le BOEN n° 31 du 30 juillet 2020

« **séismes** » p109

2025

Projet de programmes de sciences de la vie et de la Terre du cycle 4 (juillet 2025)

« L'activité sismique se concentre principalement aux frontières des plaques lithosphériques. Un séisme correspond à la libération brutale d'énergie convertie en ondes sismiques qui se propagent et provoquent des mouvements du sous-sol. »

« Modéliser le lien entre le mouvement des plaques lithosphériques, l'accumulation de tensions au niveau des failles et la survenue d'un séisme lors de la libération brutale d'énergie accumulée. » p. 19

« Cette partie se prête bien à l'étude de séismes ou d'éruptions volcaniques, à la réalisation de modèles et à la critique des résultats obtenus. » p. 22

Commentaires :

2005-2006-2008 :

- La cause de l'accumulation d'énergie n'est pas mentionnée et, en conséquence, le type d'énergie non plus.
- La rupture au foyer est considérée comme la seule source d'ondes sismiques, ce qui n'est pas le cas.
- la rupture se fait parfois au niveau d'une faille. Remplacer « parfois » par « presque exclusivement »

2016 :

- association entre une faille, deux blocs rocheux et les mouvements des plaques lithosphériques : la faille préexistante éloigne les modèles de rupture.

2020 :

- « séismes » : Difficile de faire plus condensé. Ceci fait reposer la responsabilité de la définition du contenu sur les épaules des profs. Il y aura alors une forte variabilité, c'est un programme prof-dépendant.

2025 (recommandation) :

- conversion d'énergie : Question intéressante qui oblige à s'intéresser au type d'énergie entrante et sortante (sachant que l'énergie thermique est la principale forme d'énergie sortante) ainsi qu'au convertisseur.
- modélisation et critique des modèles
- modélisation avec : mouvement des plaques, accumulation de tensions, faille, séisme et libération d'énergie.

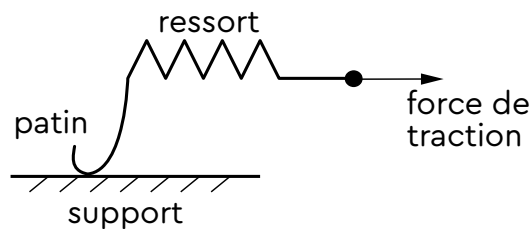
Partie 3 : Présentation de six modèles analogiques

1. Les modèles de rupture

Il existe de très nombreuses versions du modèle « je casse un objet ». J'ai choisi le modèle de rupture d'une plaque homogène : une plaque de lasagne et une fine lame de bois. Les plaques de lasagnes sont les plus utilisées en raison de leurs nombreux avantages pratiques (coût, disponibilité, etc.).

2. Les modèles de glissement frictionnel

2.1. Les modèles patin-ressort

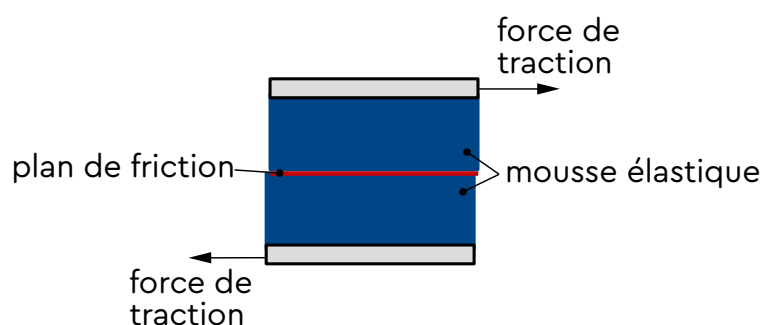


i. Le **modèle patin-ressort classique** développé dans les années 60 (R. Burridge & L. Knopoff, W. F. Brace & J. D. Byerlee) est constitué d'un bloc rigide posé sur un support horizontal et tracté par un ressort.

ii. En 2013, j'ai construit un **modèle patin-ressort de faille décrochante** avec un plan de friction vertical, inspiré du modèle de Matt Kuchta.

iii. En 2025, j'ai construit un **modèle patin-ressort de faille inverse**, inspiré du modèle pédagogique utilisé par Éric Beucler.

2.2. Les modèles à plaques de mousse



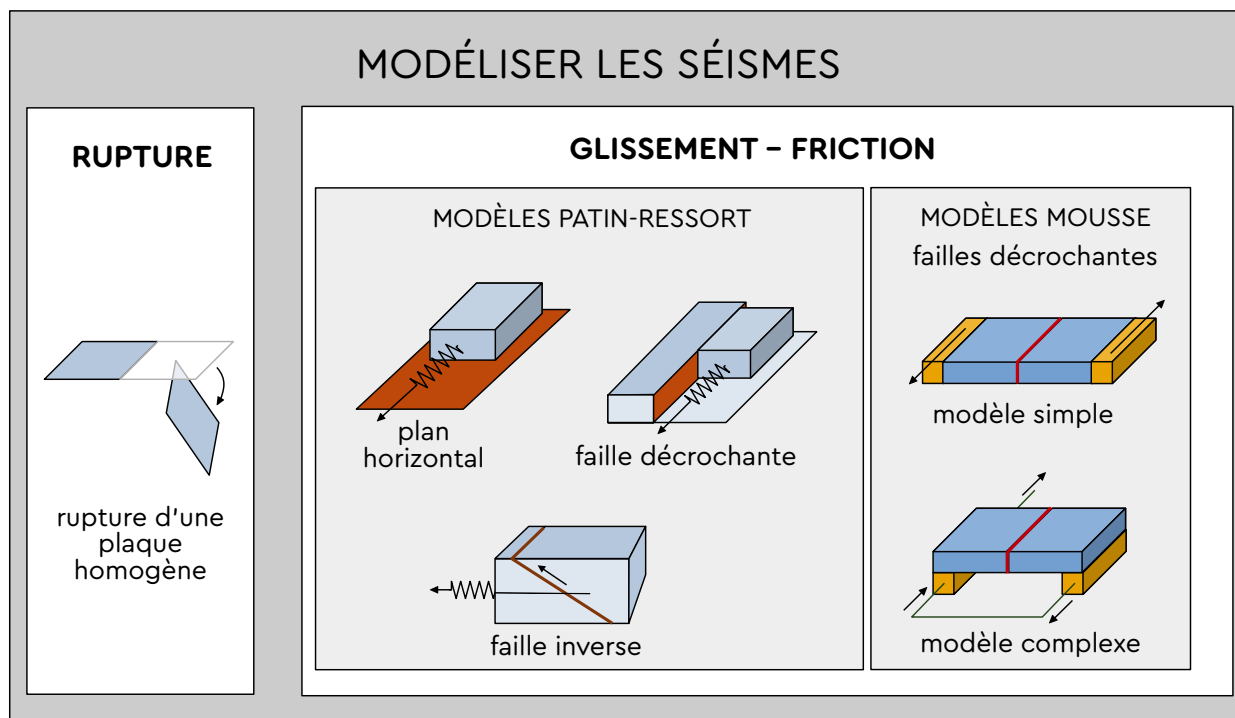
La composante élastique de ces modèles n'est plus discrète mais distribuée au sein du volume des deux plaques de mousse. J'ai construit deux modèles :

i. **une version simple** facile à concevoir et à mettre en œuvre,

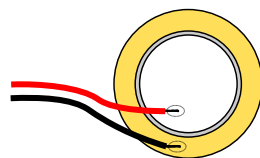
ii. **une version complexe** dont la conception et la mise en œuvre est difficile.

Pour le second modèle, j'ai eu les conseils précieux et précis de Stéphane Dominguez.

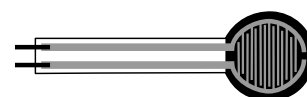
Voici, schématiquement, la structure de chacun des six modèles :



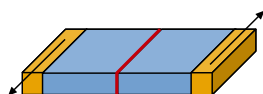
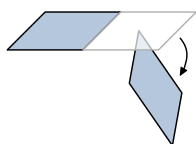
ENREGISTREMENTS
possibles avec les
six modèles



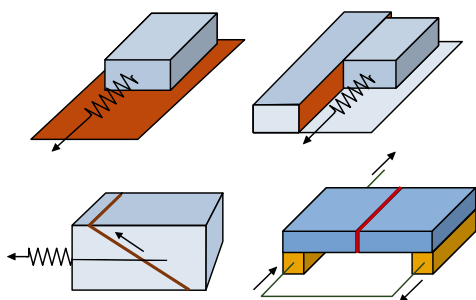
disque piézoélectrique :
enregistrement des ondes
mécaniques



capteur FSR :
enregistrement de
la force de traction



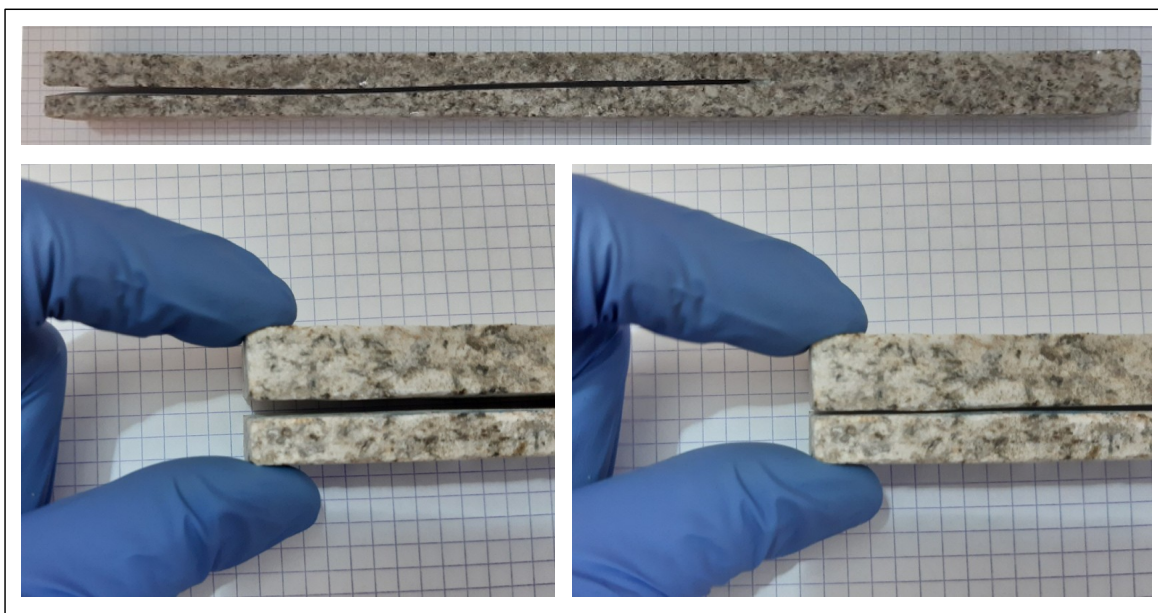
facultatif



3. Concepts physiques prérequis

3.1. Les comportements mécaniques des matériaux.

Les matériaux soumis à des contraintes se comportent de façon élastique, plastique ou cassante. Comme les modèles analogiques intègrent la composante élastique des roches, il me semble nécessaire de montrer concrètement cette propriété contre-intuitive. Une simple barre de granite partiellement sciée permet de le démontrer facilement. Lien vers la vidéo : https://youtu.be/lfb_R2FQDgo



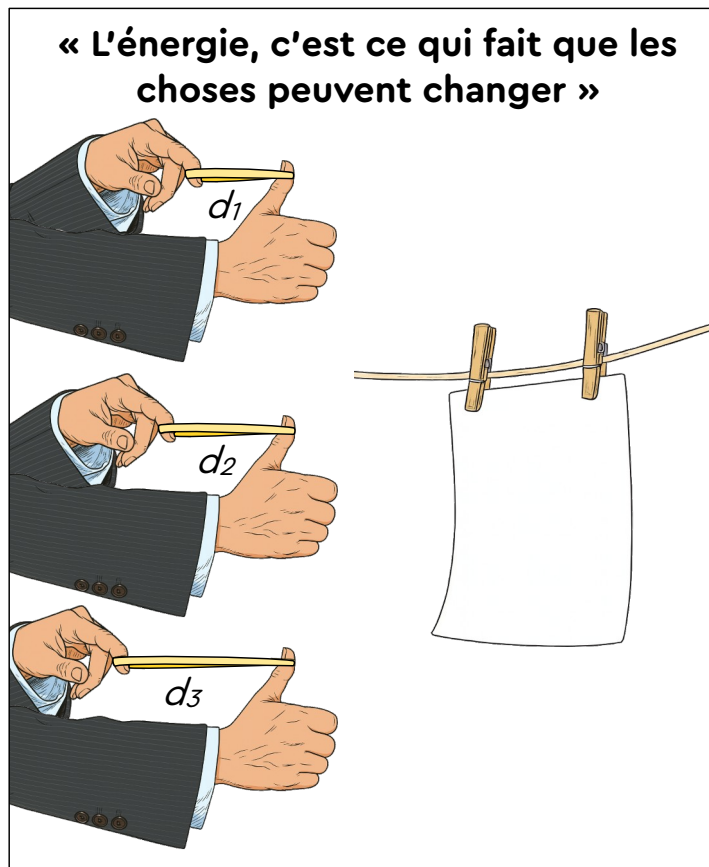
3.2. Le concept d'énergie.

Dans la mesure où la magnitude d'un séisme correspond à la quantité d'énergie qu'il libère, il paraît souhaitable de définir le concept d'énergie. J'ai opté pour la définition simple suivante : « *L'énergie, c'est ce qui fait que les choses peuvent changer.* »

L'énergie radiative, c'est-à-dire les ondes sismiques, est ce qui fait changer le paysage et, malheureusement, les constructions humaines qui s'y trouvent.

Pour rendre concrète cette définition intensive¹, j'ai choisi un scénario simple (voir les illustrations ci-dessous) : un élastique est étiré, entre l'index d'une main et le pouce de l'autre. L'élastique peut être projeté au moment voulu sur une feuille de papier suspendue à un fil. En fonction de la déformation (d_1 , d_2 ou d_3) de l'élastique, les changements observés au niveau de la cible seront plus ou moins importants : déplacement, marque d'impact ou déchirure (voir le tableau ci-dessous).

¹ Plutôt que d'utiliser la définition extensive qui consiste à dresser la liste des différentes formes d'énergie, je préfère exemplifier la définition intensive.



Peu de déformation élastique (d_1)	↔	PEU D'ÉNERGIE élastique accumulée	↔	PEU DE CHANGEMENTS observés au niveau de la cible lorsque l'énergie élastique sera libérée.
Beaucoup de déformation élastique (d_3)	↔	BEAUCOUP D'ÉNERGIE élastique accumulée	↔	BEAUCOUP DE CHANGEMENTS observés au niveau de la cible lorsque l'énergie élastique sera libérée.

Cet exemple poursuit un double objectif :

- comprendre le concept d'énergie, d'accumulation et de libération d'énergie.
- construire une métaphore dont le schéma narratif causal sera mobilisable par l'élève lorsqu'il s'agira de comprendre un modèle analogique des séismes :

Δ déformation élastique $\rightarrow$ Δ accumulation d'énergie
élastique $\rightarrow$ Δ énergie élastique libérée $\rightarrow$ Δ changements

4. Critères retenus pour l'évaluation des modèles

4.1. La pertinence

J'ai choisi d'évaluer les modèles à partir du critère de pertinence : les modèles doivent être le plus pertinent possible. Plus un modèle permet à l'élève un gain important d'informations nouvelles vraies pour un effort cognitif faible, plus le modèle sera jugé pertinent. Il est important que les informations soient vraies (elles correspondent aux connaissances scientifiques) puisqu'elles compléteront l'encyclopédie mentale de l'élève. Dans ce sens, on peut dire que c'est un gain cognitif durable.

Le nombre de caractéristiques des séismes retenues (voir le tableau ci-dessous) et la capacité explicative et prédictive auront un rôle dans l'évaluation de la pertinence.

X	1. Deux compartiments rocheux (plaques).
X	2. Comportement élastique puis cassant au-delà de la limite de rupture.
X	3. Les deux plaques sont comprimées l'une contre l'autre.
X	4. La surface de contact des plaques définit le plan de faille.
X	5. Les deux plaques mobiles sont bloquées au niveau de la faille.
X	6. Le mouvement horizontal et lent des plaques impose une déformation élastique des roches de part et d'autre de la faille. Les roches accumulent de l'énergie potentielle élastique.
X	7. La rupture se propage à partir du foyer...
X	8. produit des ondes sismiques et...
X	9. permet le glissement frictionnel rapide des deux plaques.
X	10. Ce mouvement rapide entraîne la conversion d'une partie de l'énergie potentielle élastique accumulée en énergie thermique, énergie radiative (ondes sismiques) et énergie de fracturation. C'est ce glissement qui produit l'essentiel des ondes sismiques.
X	11. Cycle sismique.
X	12. Imprévisibilité.

Certaines caractéristiques pourront avoir un **analogue structurel**, par exemple l'existence de deux compartiments rocheux. D'autres pourront avoir un **analogue fonctionnel**, par exemple l'existence d'un glissement frictionnel.

4.2. Les analogies structurelles et fonctionnelles

Le choix des analogies structurelles et fonctionnelles conditionne le niveau de pertinence du modèle. Si l'analogie permet facilement à l'élève de faire les bonnes correspondances, la pertinence sera élevée.

Exemple : « les deux plaques de mousse $\Leftrightarrow$ à deux plaques tectoniques ».

En revanche, si elle exige un effort pour corriger les écarts entre le réel et le modèle, la pertinence sera faible.

Exemple : « le ressort $\Leftrightarrow$ élasticité des plaques ».

La pertinence sera nulle si l'analogie permet d'établir de fausses correspondances.

Exemple : « la plaque de lasagne se casse en deux $\Leftrightarrow$ la plaque tectonique se casse en deux ».

Bien choisies, les analogies structurelles rendent plus faciles les inférences permettant la compréhension fonctionnelle du phénomène représenté.

Ces analogies s'appuient sur les connaissances déjà présentes dans l'encyclopédie mentale de l'élève, d'où la nécessité de définir le concept d'énergie et modifier l'hypothèse selon laquelle les roches ne sont pas élastiques.

4.3. La capacité explicative et prédictive

Elle est liée à la pertinence par cet enchaînement causal :

Les analogies bien choisies augmentent le niveau de pertinence du modèle en permettant à l'élève d'établir les bonnes correspondances entre le modèle et le réel. Une fois ces correspondances établies, il est possible d'avoir une explication des processus sismiques. Grâce à cette explication plausible, il est possible de formuler des hypothèses prédictives testables.

L'exemple d'explication choisi : la récurrence.

L'explication de l'activité sismique récurrente d'une zone géographique gagnera en crédibilité si le modèle produit lui-même une série de "séismes" ou si des cycles sismiques au cours de son fonctionnement.

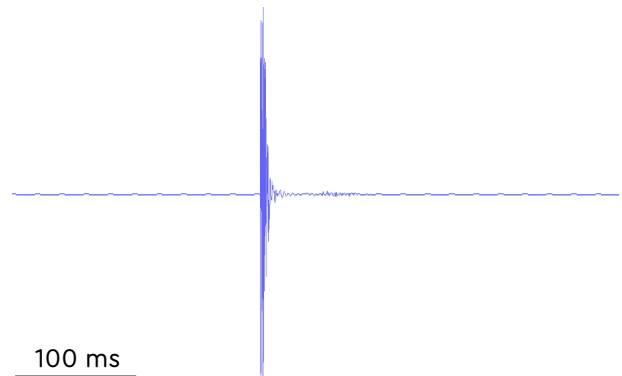
L'exemple de prédiction choisi : la relation entre le glissement et la magnitude.

Un modèle ne pourra tester la robustesse de l'hypothèse d'un lien causal entre la distance de glissement (d) et la magnitude d'un séisme que s'il est possible de modifier d sur le modèle (ou si le fonctionnement du modèle produit lui-même des Δd) et d'observer la corrélation qualitative entre Δd et les ondes mécaniques enregistrées.

La capacité de rétrodiction aurait pu être ajoutée.

A : Modèle de rupture d'une plaque de lasagne

La plaque de lasagne peut être remplacée par une lame de bois (voir ci-dessous), une plaque de polystyrène, de polyuréthane, de chocolat, une règle en plastique, etc. Les éléments, la structure et les événements restent identiques.



Rupture d'une plaque de lasagne : Le signal enregistré par le capteur piézoélectrique (disque céramique-laiton de 35 mm) est bref et très fort. La carte son est facilement saturée si le capteur piézoélectrique est trop proche ou non amorti.



Rupture d'une lame de bois sous l'action d'un serre-joint en trois étapes : lame rectiligne, déformation élastique puis rupture.

Critique du modèle

Rup et Gis sont deux profs de SVT qui discutent -incroyable coïncidence- des modèles analogiques des séismes.

Rup : Franchement, le modèle de la lasagne, ça marche. Les élèves voient la déformation, l'accumulation d'énergie potentielle élastique, puis la rupture. Ils entendent même les ondes enregistrées par le smartphone. C'est rapide et tu montres quelque chose de concret.

Glis : Tu montres surtout une confusion. Tu fais passer un dispositif général de monstration de propriétés mécaniques d'un matériau contraint pour un modèle spécifique des séismes. Ce n'est pas la même chose.

Rup : C'est un modèle, c'est donc simplifié. Tu confonds modèle et copie du réel. Dans un modèle, on doit faire le choix, parfois difficile, des caractéristiques de l'objet réel qui sont à garder.

Glis : Simplifier n'est pas le problème. Le problème, c'est la liste de caractéristiques qu'on choisit de garder. Là, tu supprimes le mécanisme central : le glissement frictionnel cosismique le long d'une faille, faille qui, entre parenthèses est préexistante. Sans lui, tu ne parles pas vraiment de séisme, tu parles juste de comportement mécanique.

Rup : Avec le glissement frictionnel cosismique, tu perds 9 élèves sur 10. Avec les lasagnes, ils comprennent qu'il y a accumulation puis libération brutale d'énergie sous forme d'ondes sismiques. C'est bien l'idée de base, non ?

Glis : Non, c'est une idée beaucoup trop générale. N'importe quel objet qu'on déforme et qui se casse brutalement deviendrait *ipso facto* un modèle de séisme : un verre jeté contre un mur, un biscuit brisé entre le pouce et l'index. Est-ce que tout ça devient un modèle de séisme ? Un séisme, ce n'est pas seulement « ça casse ! ». L'onde de fracture ultra-rapide le long de la faille, c'est une chose, mais le front de glissement frictionnel qui décale les deux compartiments rocheux de part et d'autre de la faille et qui génère l'essentiel des ondes sismiques, ça c'est bien l'idée de base, comme tu dis. Je ne sous estime pas l'importance de la rupture, premièrement parce que sans elle il n'y a pas de séisme et deuxièmement, elle génère des ondes sismiques qui peuvent être destructrices.

Rup : Tu compliques inutilement les choses, les BO ne disent rien de tout ça, dans celui de 2008 on peut lire noir sur blanc : « Des contraintes s'exerçant en permanence sur les roches conduisent à une accumulation d'énergie qui finit par provoquer leur rupture. Le foyer du séisme est le lieu où se produit la rupture. A partir du foyer, la déformation se propage sous forme d'ondes sismiques. ». C'est exactement ce que je fais avec mon modèle de lasagne. Avec un modèle de ce genre, les élèves sont capables de saisir le rapport entre le modèle et le réel. Ton exemple de verre jeté contre un mur est caricatural.

Glis : Caricatural ? Non, pas vraiment. Revenons à ton modèle, tu dis que les élèves font le lien modèle/réel, mais justement, c'est ça le problème, c'est à eux d'établir les correspondances entre la lasagne et la croûte terrestre. Cet effort métareprésentationnel a un coût cognitif énorme. Un modèle devrait rendre ces correspondances visibles, ainsi le gain cognitif serait plus grand et le coût plus faible. C'est ce qu'on appelle un modèle pertinent : l'élève obtient un maximum d'informations nouvelles et vraies pour un même effort cognitif.

Rup : Tu compliques encore une fois les choses. Moi, je suis pragmatique, je dois faire avec le temps, le programme, l'attention des élèves. Il me faut quelque chose de simple, rapide, qui capte leur attention. En pratique, ça fonctionne. Les élèves s'en souviennent des années après.

Glis : Je connais ces contraintes. Mais l'effet de surprise, le côté spectaculaire, ce n'est pas un critère de qualité épistémologique. J'appelle ça « l'effet Wouaw », c'est une expression idiosyncrasique qui veut dire que lorsque les élèves manifestent leur joie, leur surprise, le prof pense qu'à l'évidence, l'objectif pédagogique est atteint. C'est bien sûr une illusion qui fait qu'on confond pertinence théâtrale et pertinence cognitive. Du côté des élèves, tu dis qu'ils s'en souviennent, mais ils se souviennent de la lasagne qui casse, pas forcément de ce qu'est un séisme. Si tu veux vraiment garder tes lasagnes, et que tu ne prends pas le temps d'explicitier ce qui manque -le glissement frictionnel cosismique, la faille- tu risques de renforcer des misconceptions.

Rup : Donc, si je comprends bien, tu veux bien me laisser les lasagnes, mais tu veux que je change ce que je dis : « Voici ce que montre le modèle et voilà ce qu'il ne montre pas. », c'est ça ?

Glis : Oui, admettons... si ton objectif est de montrer la déformation élastique et la rupture d'un matériau contraint, la lasagne, c'est très bien. Mais si ton objectif est de faire comprendre l'origine des séismes, elle est insuffisante : il manque le phénomène central.

Rup : Ce qui m'amènerait, pour être cohérent, à présenter au moins deux dispositifs ou deux modèles, je ne sais plus : la lasagne pour la rupture élastique, et un autre pour le glissement frictionnel ?

Glis : Oui, enfin, si tu veux vraiment optimiser ton temps, je te conseille de prendre directement un modèle qui montre le glissement frictionnel. Là, tu aurais à la fois la simplicité -que tu recherches- et la pertinence.

Rup : Finalement, je garde quand même mes lasagnes, mais je dis que je montre une rupture élastique. Et je cherche un modèle de séisme avec faille préexistante, glissement frictionnel et pourquoi pas, montrer un cycle sismique pour expliquer la récurrence des séismes dans certaines zones du globe. Là ça te va ? De toute façon, tu le sais très bien, il n'y a pas que le "bon" modèle qui compte. Ce que tu en fais en classe est l'aspect le plus important.

Glis : Ça me va, disons que j'ai réussi à faire évoluer tes pratiques. C'est le but des discussions entre collègues, non ?

	1. Deux compartiments rocheux (plaques).
X	2. Comportement élastique puis cassant au-delà de la limite de rupture.
	3. Les deux plaques sont comprimées l'une contre l'autre.
	4. La surface de contact des plaques définit le plan de faille.
	5. Les deux plaques mobiles sont bloquées au niveau de la faille.
	6. Le mouvement horizontal et lent des plaques impose une déformation élastique des roches de part et d'autre de la faille. Les roches accumulent de l'énergie potentielle élastique.
X	7. La rupture se propage à partir du foyer...
X	8. produit des ondes sismiques et...
	9. permet le glissement frictionnel rapide des deux plaques.
	10. Ce mouvement rapide entraîne la conversion d'une partie de l'énergie potentielle élastique accumulée en énergie thermique, énergie radiative (ondes sismiques) et énergie de fracturation. C'est ce glissement qui produit l'essentiel des ondes sismiques.
	11. Cycle sismique.
X	12. Imprévisibilité.

Conclusion

Ces modèles intègrent seulement 3 des 12 caractéristiques des séismes. Glis a mentionné l'absence de faille et de glissement frictionnel, les analogies de structure et de fonctionnement sont donc très faibles. La fracture destructrice empêche l'explication et la prédiction qui ont été choisies.

Avec cette structure, une plaque homogène et ce fonctionnement, la flexion puis la rupture, les élèves pourraient inférer que lors d'un séisme, une plaque tectonique fléchit puis se casse pour former deux plaques.

D'autres inférences inexactes peuvent être faites à partir de ce modèle.

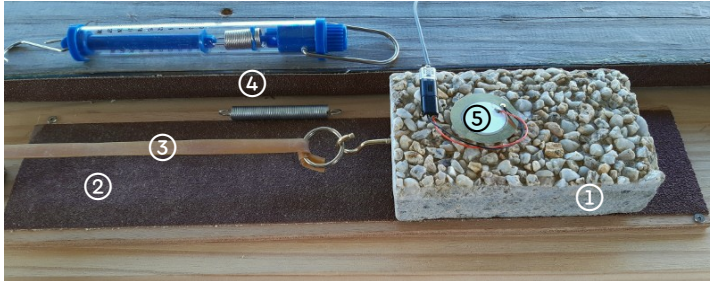
Pour toutes ces raisons, la pertinence de ce modèle est, selon moi, la plus faible des six.

Mauvaise
inférence
potentielle :

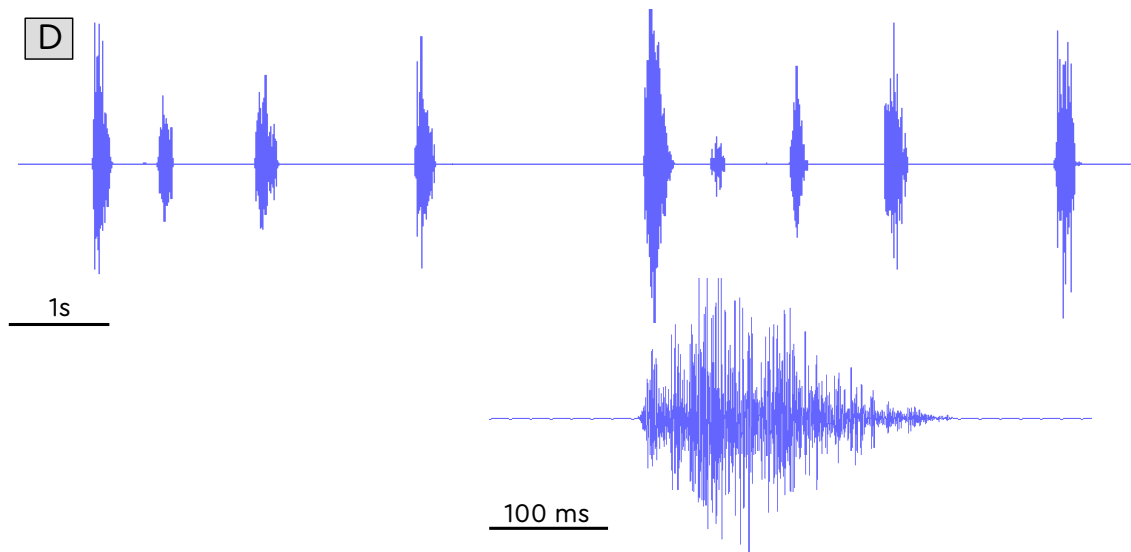
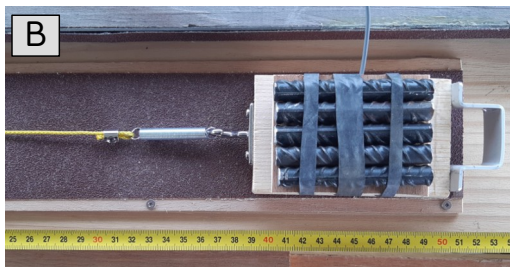


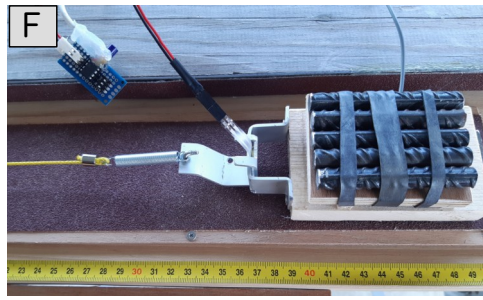
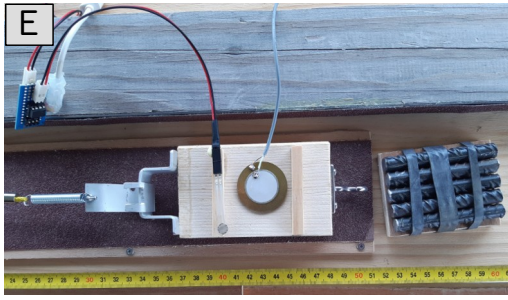
B : Modèle patin-ressort à plan horizontal

C'est probablement le modèle analogique des séismes le plus connu et le modèle préféré des chercheurs. Le premier modèle présenté est le plus simple : un bloc tracté par un ressort ou un élastique. Le second modèle optimise l'enregistrement des ondes mécaniques par le capteur piézoélectrique et permet l'enregistrement de la force de traction grâce à un capteur FSR.



Un bloc de roche ou de béton ① repose sur une bande de ponçage ②. Il est tracté grâce à un élastique ③, un ressort ou un dynamomètre ④. Un capteur piézoélectrique ⑤ permet d'enregistrer les ondes mécaniques produites lors de chaque glissement.



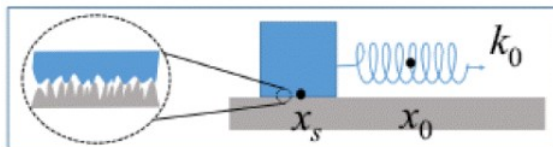


A : Vue d'ensemble du dispositif : ① treuil manuel, ② bande de ponçage, ③ ressort, ④ bloc mobile muni d'un capteur piézoélectrique et ⑤ masse ajustable en fonction de la raideur du ressort et du grain des bandes de ponçage. Une bande de ponçage est fixée à la face inférieure du bloc mobile.
B : Dispositif complet en place avec un ressort. Ce dernier peut être remplacé par un élastique.
C : Le ressort simple peut être remplacé par un dynamomètre.
D : Enregistrement des ondes mécaniques par la capteur piézoélectrique.
E et F : Un capteur de force résistif (FSR) peut compléter le dispositif.
 (pour les enregistrements voir le dernier modèle présenté)

Critique du modèle

x	1. Deux compartiments rocheux (plaques).
x	2. Comportement élastique puis cassant au-delà de la limite de rupture.
x	3. Les deux plaques sont comprimées l'une contre l'autre.
x	4. La surface de contact des plaques définit le plan de faille.
x	5. Les deux plaques mobiles sont bloquées au niveau de la faille.
	6. Le mouvement horizontal et lent des plaques impose une déformation élastique des roches de part et d'autre de la faille. Les roches accumulent de l'énergie potentielle élastique.
	7. La rupture se propage à partir du foyer...
	8. produit des ondes sismiques et...
x	9. permet le glissement frictionnel rapide des deux plaques.
x	10. Ce mouvement rapide entraîne la conversion d'une partie de l'énergie potentielle élastique accumulée en énergie thermique, énergie radiative (ondes sismiques) et énergie de fracturation. C'est ce glissement qui produit l'essentiel des ondes sismiques.
x	11. Cycle sismique.
x	12. Imprévisibilité.

C'est un modèle précieux pour les sismologues et géophysiciens, car il se prête facilement à une formalisation mathématique (voir l'exemple ci-dessous). Il existe même des modèles numériques de ce modèle analogique !



Pik-Yin Lai, Penger Tong, YAN Caishan & Hsuan-Yi Chen (2023) Statistical laws of stick-slip friction at mesoscale, Springer Nature Research Communities

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} = k_0 (U t - x) - F_i(x)$$

Ce modèle possède 9 des 12 caractéristiques de la liste.

Il permet d'expliquer la récurrence des séismes dans une même zone et permet de tester l'hypothèse d'un lien causal entre la distance de glissement et la "magnitude". Sa capacité explicative et prédictive est donc bonne.

On pourrait attribuer à ce modèle une forte pertinence, mais sa géométrie est étrange : les éléments analogues des plaques tectoniques sont superposés, créant ainsi un plan de faille horizontal. À partir de cette structure, il est tentant d'inférer que l'ensemble des plaques se recouvrent, au moins partiellement.

Comme tous les autres modèles patin-ressort, il présente un second problème : la composante élastique est externalisée et discrète (alors qu'elle est intégrée et distribuée dans les modèles à plaques de mousse). L'élément élastique (ressort, dynamomètre, élastique) ne possède aucun analogue réel.

La pertinence de ce modèle est affectée par la présence de ces deux propriétés que je considère comme étant des défauts. En effet, l'effort cognitif demandé aux observateurs sera le suivant : reconstruire un modèle abstrait dont la géométrie est en accord avec le réel et transformer un objet concret, l'élastique ou le ressort, en propriété intrinsèque des roches. Cette construction abstraite qui sert de pont entre le modèle analogique et le réel a un coût cognitif. Tout cela diminue la pertinence du modèle.

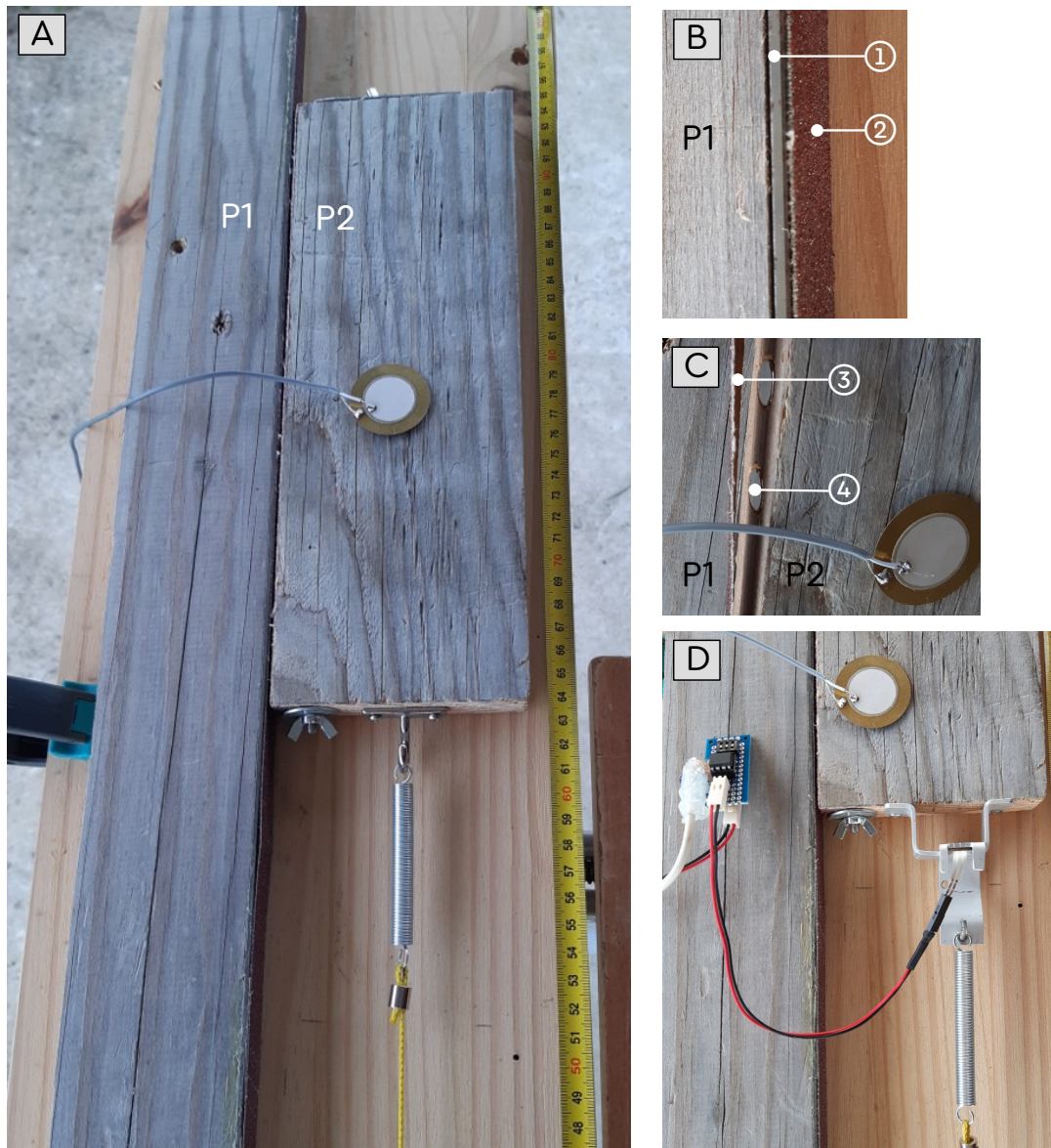
Ce modèle classique reste néanmoins **un bon modèle qu'on peut avantageusement substituer au modèle de rupture.**

Mauvaise
inférence
potentielle :



C. Modèle patin-ressort à faille décrochante et à faille inverse

Le premier modèle, à faille décrochante, est une adaptation du modèle précédent. Ici le plan de friction horizontal devient un plan de faille vertical qui sépare deux plaques P1 et P2, homologues de deux plaques tectoniques. Une force magnétique assurée par plusieurs aimants insérés dans la plaque P2 et par un plat en acier fixé à la plaque P1, remplace le poids du bloc sur le plan horizontal.

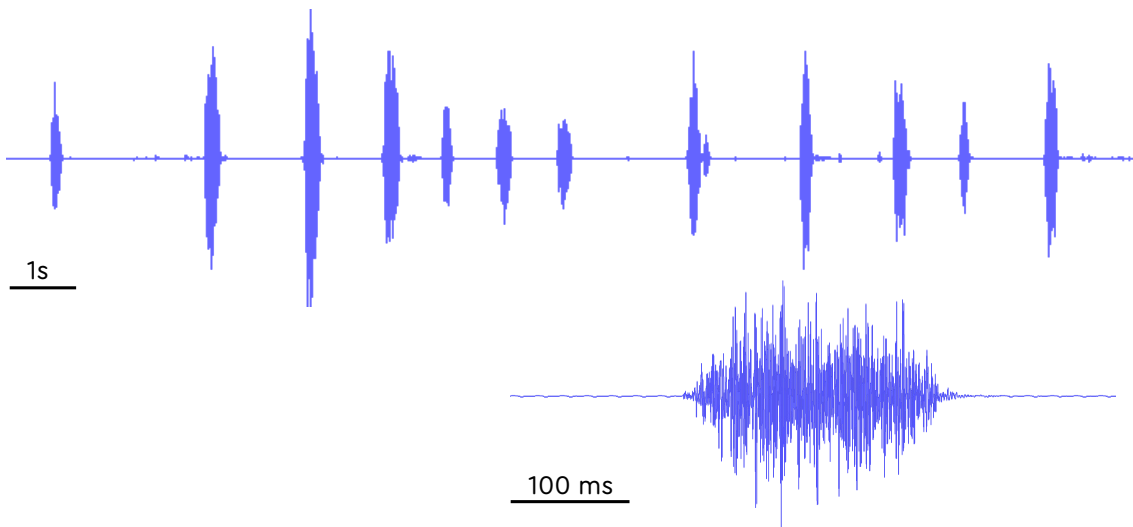


A : Vue d'ensemble du dispositif. P1 est la plaque fixe, P2 est la plaque mobile. Un disque piézoélectrique est fixée sur P2.

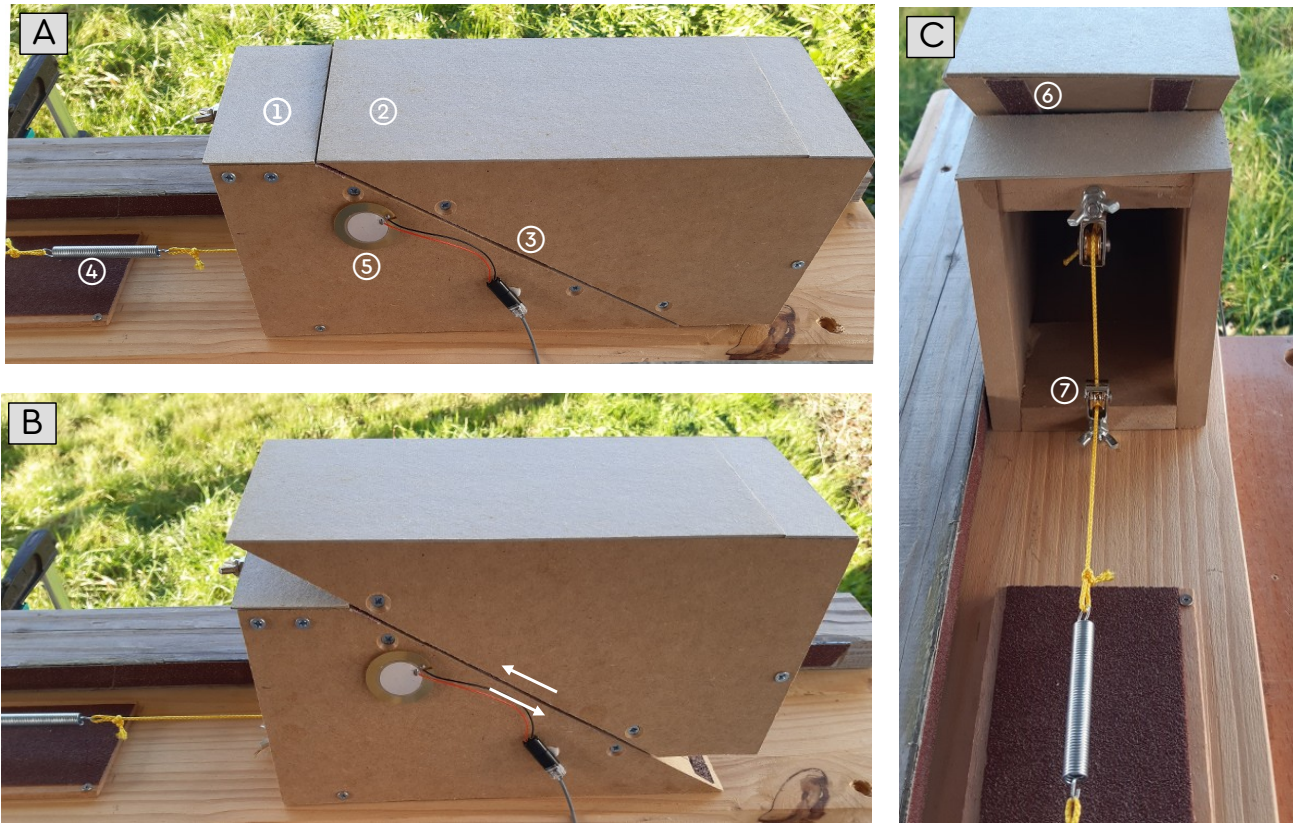
B et C : Détails de l'interface P1/P2. ① plat en acier fixé à P1, ② bande de ponçage fixée sur l'acier, ③ bande de ponçage fixée sur P2 et ④ aimants fixés dans des loges de P2.

D : Le dispositif peut être complété par un capteur FSR.

Enregistrement des ondes mécaniques par le capteur piézoélectrique :



Modèle patin-ressort à faille décrochante

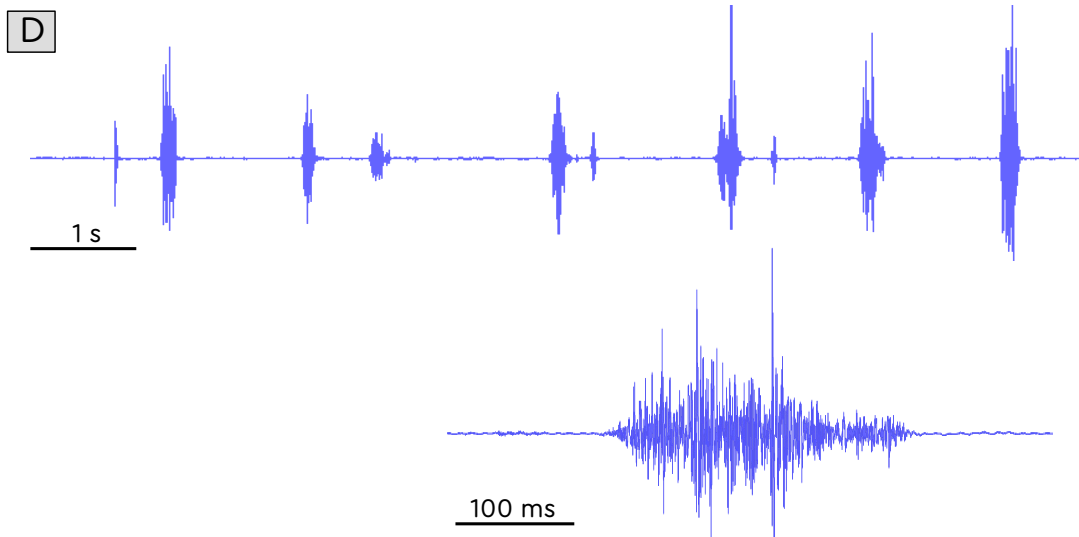


A. Deux compartiments ① et ② sont séparés par une faille oblique ③. Le compartiment ① est fixe et le ② est mis en mouvement par la traction d'une corde à ressort ④. Un capteur piézoélectrique ⑤ permet d'enregistrer les ondes mécaniques.

B. L'originalité de ce modèle réside dans le fait qu'il modélise une faille inverse.

C. Des bandes de ponçages sont collées sur la surface des deux compartiments, les unes perpendiculaires aux autres ⑥. Deux petites poulies ⑦ permettent d'orienter correctement la force de traction.

D. Enregistrement des ondes mécaniques.



Critique des deux modèles

Ces deux modèles corrigent le défaut du modèle précédent : leur géométrie est plus réaliste. Le problème du ressort sans analogue réel persiste.

Leur capacité explicative et prédictive est la même que pour le modèle précédent.

Ils possèdent 9 des 12 caractéristiques des séismes.

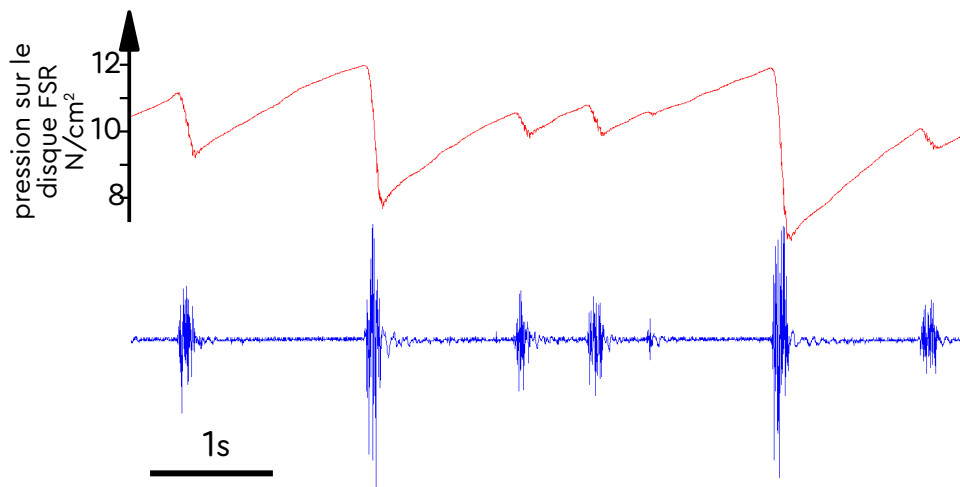
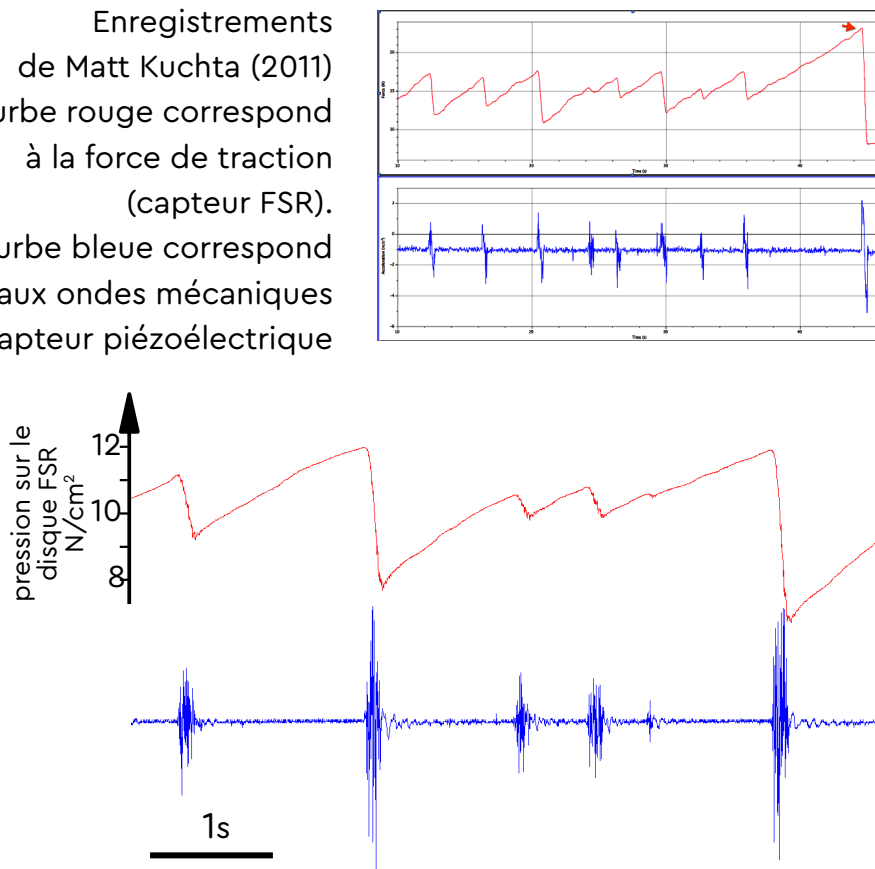
On peut raisonnablement attribuer à **ces deux modèles une pertinence supérieure à celle du patin-ressort classique.**

La fabrication de ces deux modèles demande un peu de bricolage, surtout pour le modèle à faille inverse. Ce n'est pas un défaut rédhibitoire dans la mesure où la durée de vie de la maquette dépasse la durée d'une carrière de professeur !

X	1. Deux compartiments rocheux (plaques).
X	2. Comportement élastique puis cassant au-delà de la limite de rupture.
X	3. Les deux plaques sont comprimées l'une contre l'autre.
X	4. La surface de contact des plaques définit le plan de faille.
X	5. Les deux plaques mobiles sont bloquées au niveau de la faille.
	6. Le mouvement horizontal et lent des plaques impose une déformation élastique des roches de part et d'autre de la faille. Les roches accumulent de l'énergie potentielle élastique.
	7. La rupture se propage à partir du foyer...
	8. produit des ondes sismiques et...
X	9. permet le glissement frictionnel rapide des deux plaques.
X	10. Ce mouvement rapide entraîne la conversion d'une partie de l'énergie potentielle élastique accumulée en énergie thermique, énergie radiative (ondes sismiques) et énergie de fracturation. C'est ce glissement qui produit l'essentiel des ondes sismiques.
X	11. Cycle sismique.
X	12. Imprévisibilité.

Mes premiers enregistrements avec le modèle de faille décrochante datent de 2013. Je me suis inspiré pour cela des travaux du Dr Matthew Kuchta (University of Wisconsin-Stout), en changeant l'interface et les capteurs pour réduire drastiquement le coût.

Enregistrements
de Matt Kuchta (2011)
La courbe rouge correspond
à la force de traction
(capteur FSR).
La courbe bleue correspond
aux ondes mécaniques
(capteur piézoélectrique)



Comme pour tous les modèles qui sont compatibles avec les deux capteurs : piézoélectrique et capteur de force FSR, les enregistrements présentés ci-dessus sont possibles.

Il ne faut pas considérer ces graphiques comme étant des données supplémentaires difficiles à interpréter. Ils apportent au contraire des indices visuels propres à établir plus facilement la chaîne causale qui va de l'augmentation lente des contraintes jusqu'à la libération brusque d'énergie mécanique.

En observant le modèle, on peut voir que l'augmentation de la force de traction (courbe rouge) analogue de la contrainte de cisaillement, se traduit par l'augmentation de la déformation du ressort (ou des plaques de mousse pour les modèles suivants).

Pendant la courte durée de la chute de contrainte, des ondes mécaniques sont enregistrées, elles correspondent aux séismes. La déformation élastique diminue elle aussi brutalement.

Ces enregistrements montrent l'imprévisibilité temporelle des séismes ainsi que l'imprévisibilité de leur magnitude.

D. Le modèle à plaques de mousse – version simple

Lien vers la vidéo : <https://youtu.be/6jsZOolzNGo>



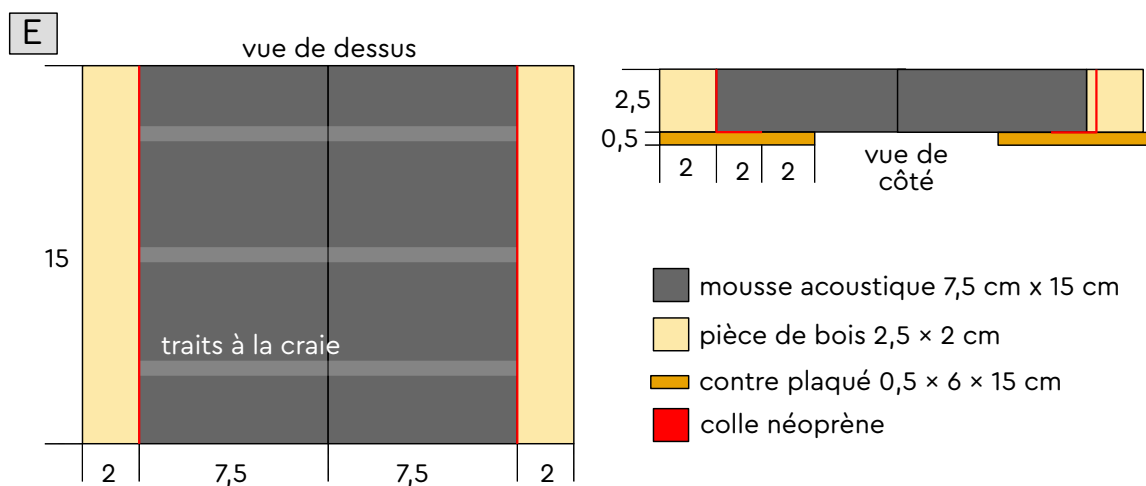
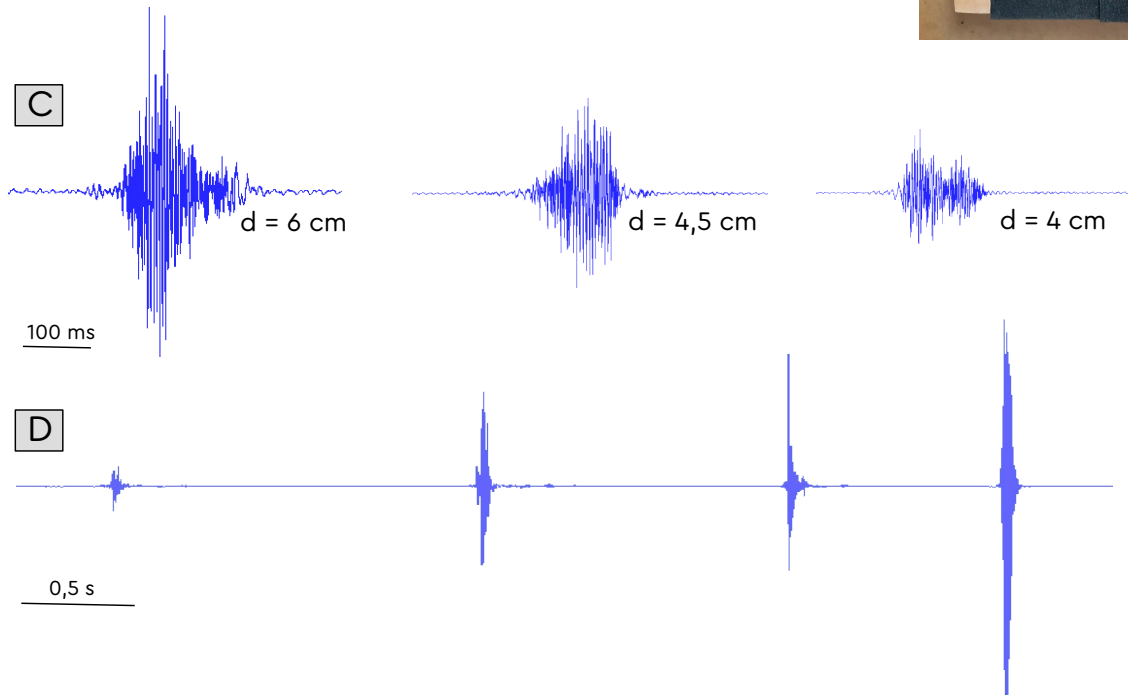
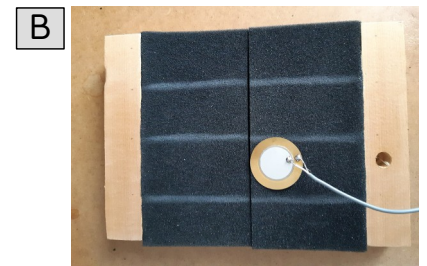
A. Les trois étapes de la mise en œuvre du modèle "mousse" version simple.

B. Dans un second temps ce modèle peut être équipé d'un capteur piézoélectrique.

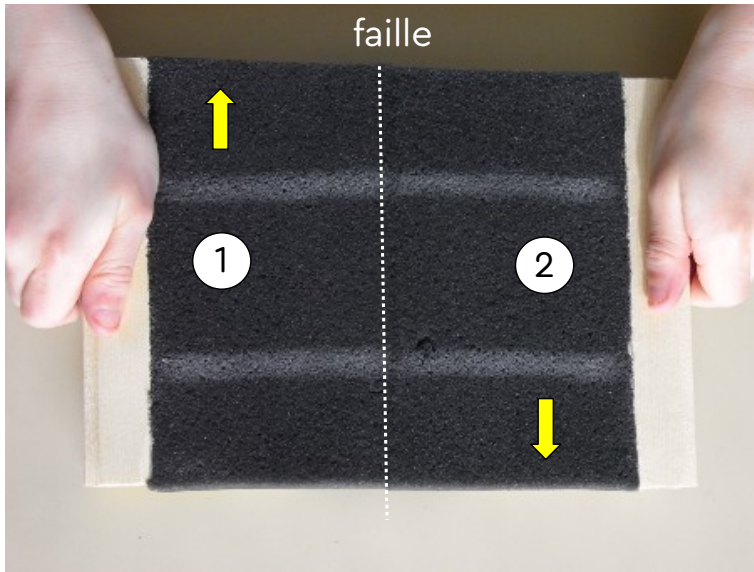
C. Trois enregistrements de trois "séismes de plaques de mousse".

D. Enregistrement de quatre "séismes" successifs.

E. Plan de construction de ce modèle.

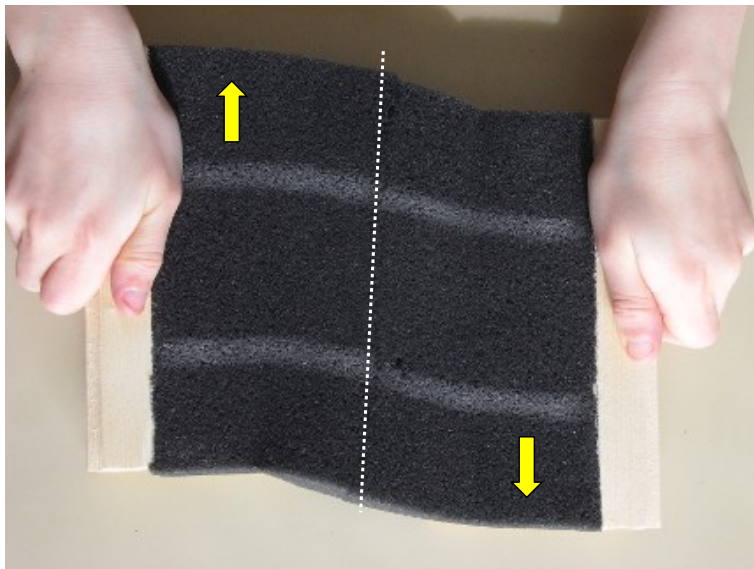


Proposition d'un bilan illustré grâce au modèle à plaques de mousse version simple



Les plaques tectoniques 1 et 2 bougent l'une par rapport à l'autre mais elles sont bloquées au niveau d'une faille.

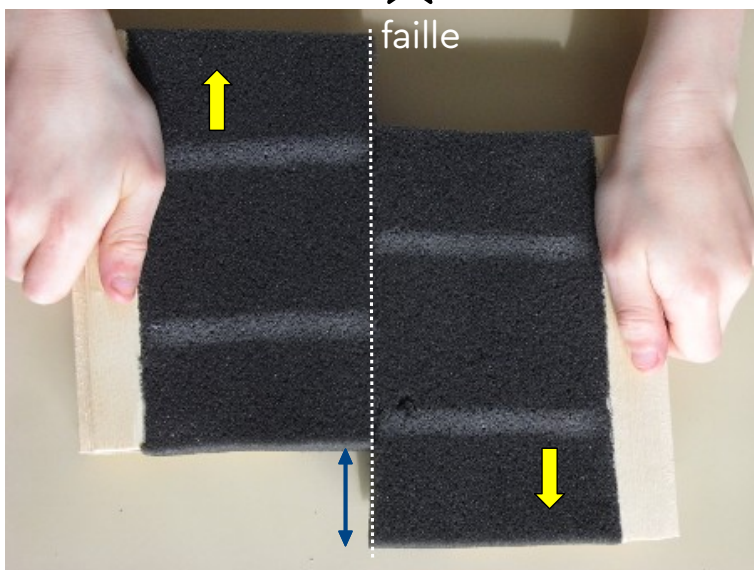
↕ sens du mouvement des plaques l'une par rapport à l'autre



Les plaques continuent leur mouvement et se déforment. C'est une déformation élastique qui accumule de l'énergie*.

* l'énergie est ce qui fait que les choses changent

★ séisme



Quand la pression dépasse la résistance des roches, elles cassent au niveau du foyer. Les plaques GLISSENT BRUSQUEMENT le long de la faille.

L'énergie élastique accumulée est alors libérée sous forme d'ondes sismiques : C'EST LE SÉISME ! C'est le glissement rapide des plaques qui libère le plus d'ondes sismiques.

Après le séisme les roches sont décalées.

Les plaques tectoniques continuent leur mouvement... jusqu'au prochain séisme.

↕ Plus le décalage est important, plus la magnitude du séisme sera grande.

Critique du modèle

X	1. Deux compartiments rocheux (plaques).
X	2. Comportement élastique puis cassant au-delà de la limite de rupture.
X	3. Les deux plaques sont comprimées l'une contre l'autre.
X	4. La surface de contact des plaques définit le plan de faille.
X	5. Les deux plaques mobiles sont bloquées au niveau de la faille.
X	6. Le mouvement horizontal et lent des plaques impose une déformation élastique des roches de part et d'autre de la faille. Les roches accumulent de l'énergie potentielle élastique.
	7. La rupture se propage à partir du foyer...
	8. produit des ondes sismiques et...
X	9. permet le glissement frictionnel rapide des deux plaques.
X	10. Ce mouvement rapide entraîne la conversion d'une partie de l'énergie potentielle élastique accumulée en énergie thermique, énergie radiative (ondes sismiques) et énergie de fracturation. C'est ce glissement qui produit l'essentiel des ondes sismiques.
X	11. Cycle sismique.
X	12. Imprévisibilité.

Ce modèle coche 10 caractéristiques sur 12.

La capacité explicative est bonne : on observe et on peut enregistrer la récurrence des séismes (figure D).

La capacité prédictive est bonne : les signaux du capteur piézoélectrique peuvent être comparés entre eux et mis en relation avec la longueur du glissement (figures A et C).

Comme le mouvement des plaques se fait à la main, il n'est pas toujours facile de comparer les tracés entre eux.

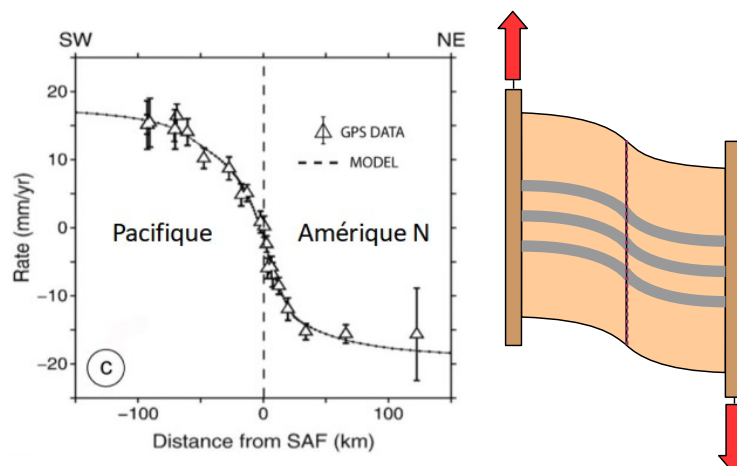
Les analogies de structure sont respectées (points 1 à 4).

Les analogies de fonctionnement sont respectées, sauf la rupture et les ondes sismiques qu'elle produit (points 7 et 8).

Premier atout de ce modèle : la composante élastique est intégrée et distribuée au sein des deux plaques de mousse.

Deuxième atout : la géométrie de la déformation élastique des deux plaques de mousse est analogue à la géométrie de la déformation des deux plaques tectoniques. (voir le graphique et le schéma ci-dessous).

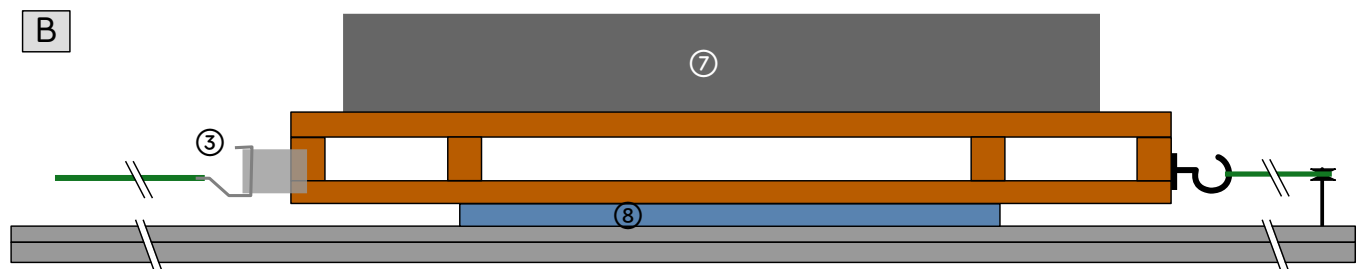
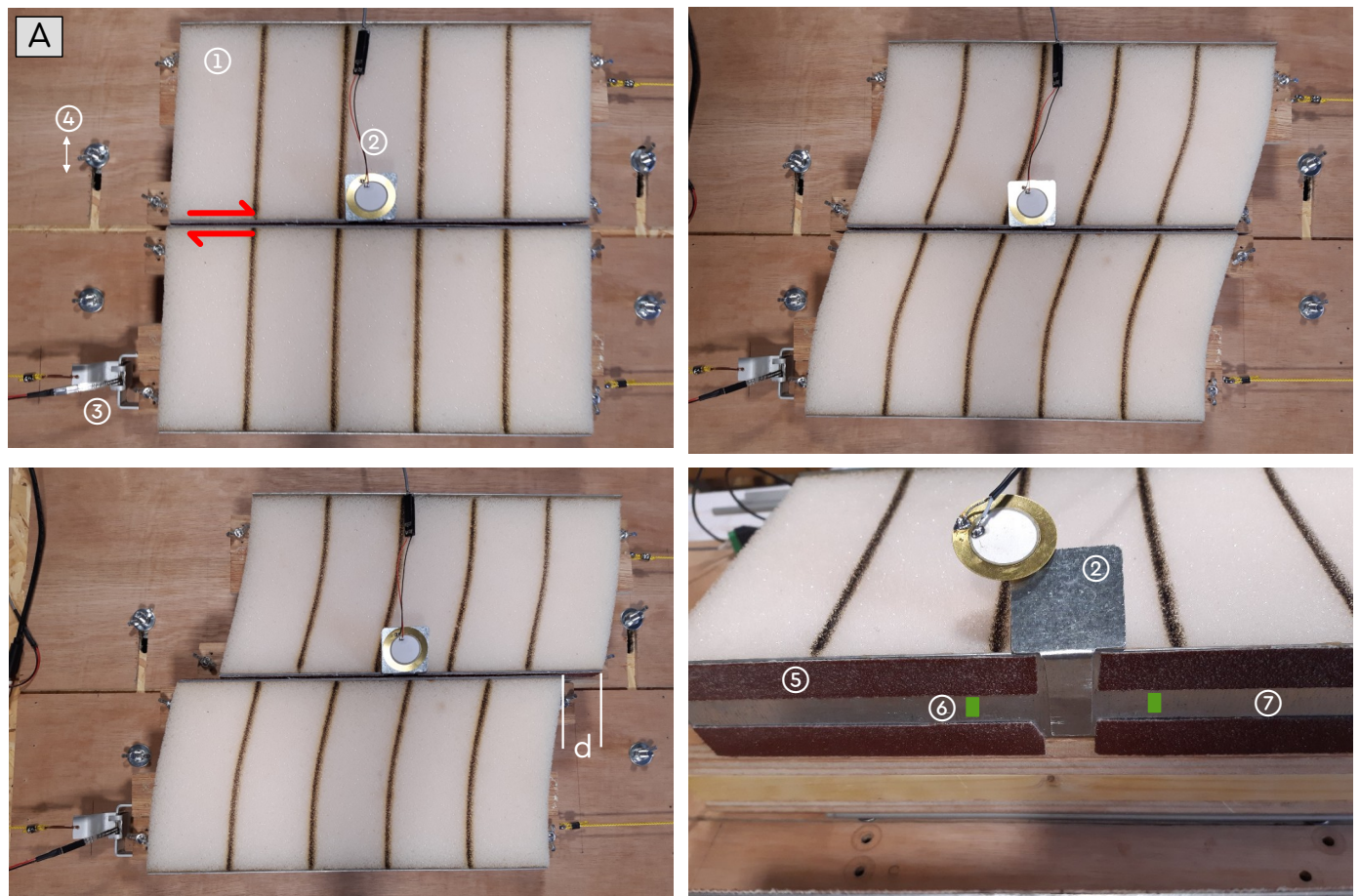
Source de la figure de gauche :
Schmalzle et al., 2006 cité dans
Yannick Caniven. Cinématique et
Mécanique des Failles
Décrochantes à l'échelle de
Temps du Cycle Sismique :
Apports d'un Modèle
Expérimental. Tectonique.
Université de Montpellier 2, 2014.
p. 10



Troisième atout : sa construction et son fonctionnement sont très simples.

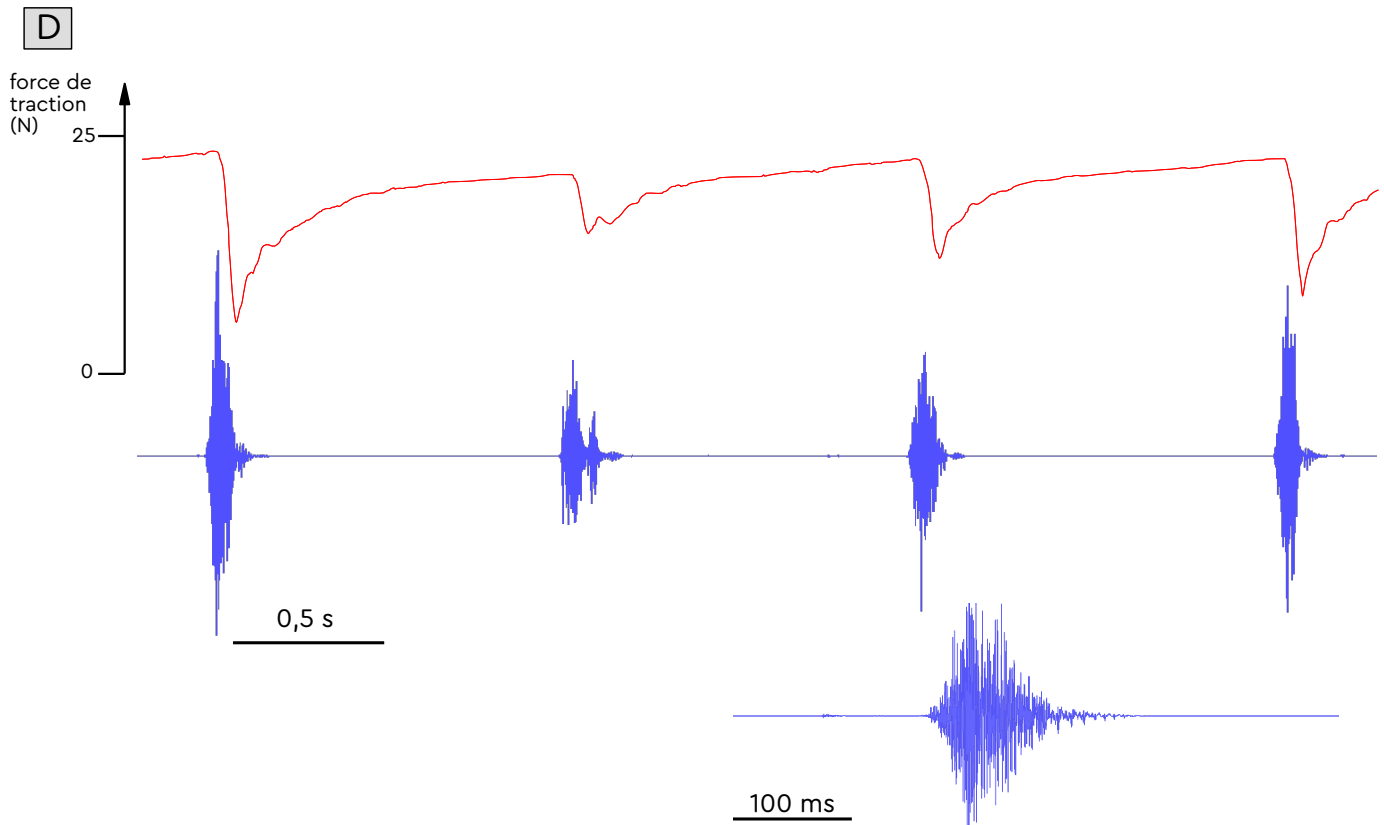
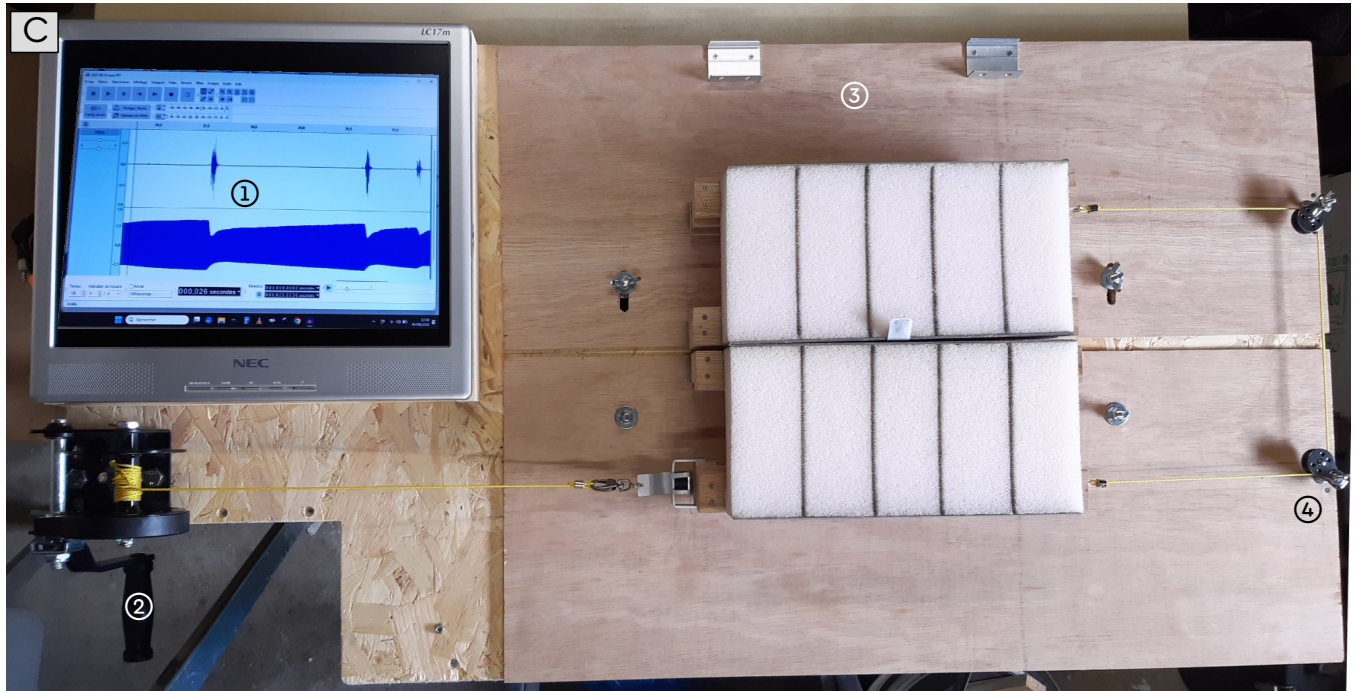
E. Le modèle à plaque de mousse – version complexe

Lien vers la vidéo : [https://youtu.be/K_ZQ\\$drblwA](https://youtu.be/K_ZQ$drblwA)



A : Deux plaques de mousse ① ($\text{HR } 26 \text{ kg/m}^3$, $30 \times 15 \times 4 \text{ cm}$) sont collées entre deux cornières métalliques ⑦. Un capteur piézoélectrique ② est fixé sur une fine plaque en acier elle même fixée à une des cornières centrales. Ces deux éléments sont fixés par de la pâte adhésive repositionnable. Un capteur de force résistif ③ est intercalé entre deux plaques d'aluminium pliées. Une moitié du support est mobile ④. Les cornières centrales sont recouvertes de bandes de ponçage ⑤. Deux aimants néodyme ⑥ N52 ($10 \times 5 \times 2 \text{ mm}$). La distance de glissement (d) après chaque "séisme".

B : Vue de côté. La mobilité des plaques de mousse est assurée par des glissières de tiroir ⑧.



C : Dispositif complet vu de dessus. Un écran ① permet de voir l'enregistrement des ondes mécaniques et de la force de traction ainsi que le comportement (déformations et glissements) des deux plaques de mousse. Un treuil manuel ② permet d'exercer une force de traction sur le support des plaques de mousse. Moitié mobile du support ③. Deux poulies ④ permettent synchroniser le mouvement les deux plaques.

D : Enregistrement simultané des ondes mécaniques et de la force de traction exercée par le treuil. Cette dernière illustre la chute des contraintes au niveau de la faille. La contrainte seuil et la contrainte minimale sont variables, ceci correspond à une "date et une magnitude inconnues des séismes".

Critique du modèle

X	1. Deux compartiments rocheux (plaques).
X	2. Comportement élastique puis cassant au-delà de la limite de rupture.
X	3. Les deux plaques sont comprimées l'une contre l'autre.
X	4. La surface de contact des plaques définit le plan de faille.
X	5. Les deux plaques mobiles sont bloquées au niveau de la faille.
X	6. Le mouvement horizontal et lent des plaques impose une déformation élastique des roches de part et d'autre de la faille. Les roches accumulent de l'énergie potentielle élastique.
	7. La rupture se propage à partir du foyer...
	8. produit des ondes sismiques et...
X	9. permet le glissement frictionnel rapide des deux plaques.
X	10. Ce mouvement rapide entraîne la conversion d'une partie de l'énergie potentielle élastique accumulée en énergie thermique, énergie radiative (ondes sismiques) et énergie de fracturation. C'est ce glissement qui produit l'essentiel des ondes sismiques.
X	11. Cycle sismique.
X	12. Imprévisibilité.

Avertissement : La conception de ce modèle est difficile, elle demande du temps, de bonnes compétences en bricolage et l'achat de nombreuses pièces de quincaillerie ainsi que d'une interface.

Ce modèle possède les 10 caractéristiques sur 12.

Comme le modèle précédent, sa capacité explicative et prédictive est bonne.

Les analogies de structure et de fonctionnement sont suffisamment transparentes pour diminuer l'effort cognitif nécessaire à la compréhension du réel. Il est tentant de lui attribuer la pertinence la plus élevée, mais sa complexité technique peut être un obstacle cognitif.

Remarque :

Je travaille à la mise au point d'une version plus simple à construire et moins encombrante.

Limite potentielle de tout modèle :
 l'élève n'accède qu'à l'aspect
 superficiel de l'analogie.
 Coût cognitif trop élevé pour
 l'élève ou contexte cognitif
 partagé insuffisant ?
 Cette question intéressante sort du
 cadre limité de ce dossier.



CONCLUSION

Mettre en place des activités qui permettent aux élèves de comprendre l'origine des séismes, voilà le cadre dans lequel s'inscrit ce dossier. Il a analysé les utilisations de modèles analogiques des séismes au collège en les confrontant aux connaissances scientifiques tout en tenant compte des contraintes et des spécificités liées à l'enseignement.

La consultation des sources scientifiques accessibles pour les profs de SVT permet de confirmer que les séismes ne se réduisent pas à une simple rupture. C'est un processus en deux temps : une rupture qui se propage très rapidement à partir du foyer, suivi d'un glissement frictionnel des deux compartiments rocheux le long d'une faille préexistante. C'est essentiellement ce glissement, et non la rupture, qui convertit une fraction de l'énergie potentielle élastique accumulée en ondes sismiques, en chaleur et en ondes mécaniques de fracturation. Ignorer le glissement frictionnel cosismique, c'est prendre le risque de transmettre une vision très incomplète, et donc faussée, des processus sismiques.

Deux types de modèles analogiques ont été présentés et évalués selon les critères suivants : le nombre de caractéristiques sismiques retenues (parmi les 12 identifiées), la capacité explicative et prédictive, et surtout la pertinence, définie comme le rapport entre le gain cognitif (informations nouvelles acquises) et l'effort métareprésentationnel demandé à l'élève (effort requis).

Les modèles de rupture (plaque de lasagne, lame de bois, etc.) sont les plus utilisés. Leur succès vient probablement du fait qu'ils respectent au pied de la lettre les programmes en vigueur, par leur simplicité, leur faible coût et leur effet spectaculaire, ce que j'ai appelé « l'effet Wouaw ». Pourtant, ils ne possèdent que 3 des 12 caractéristiques des séismes. L'absence de faille préexistante, et surtout, l'absence de glissement frictionnel demandent à l'élève de faire lui-même une mise en correspondance abstraite entre le modèle et le réel. Le risque ici est de renforcer des misconceptions : l'élève retient que « ça casse », mais ne retient pas la chaîne causale qui explique l'origine des séismes. La pertinence de ces modèles est donc la plus faible des six modèles proposés.

Les modèles à glissement frictionnel présentent une alternative solide. Les modèles patin-ressort (classique à plan horizontal, à faille décrochante, à faille inverse) intègrent 9 des 12 caractéristiques. Leur capacité à produire des cycles sismiques récurrents et à tester la relation causale entre le glissement et la magnitude leur donne une bonne capacité explicative et prédictive. Le modèle à plan horizontal présente une géométrie étrange et déroutante : les deux plaques sont superposées. De plus, les trois modèles externalisent la composante élastique dans un ressort sans analogue réel. Les versions à faille décrochante et inverse gomment le défaut de structure, mais pas celui de la composante élastique.

Les modèles à plaques de mousse apportent la solution puisque ce sont les plaques elles-mêmes qui se déforment de façon élastique. Il faut ajouter que la géométrie de leur déformation est l'analogue à celle observée sur le terrain. La version simple, d'une construction et d'une mise en œuvre faciles, coche 10 caractéristiques sur 12. C'est le

modèle que je recommande pour un usage en classe. La version complexe est le modèle le plus complet, mais a un défaut majeur : sa conception et sa mise en œuvre sont difficiles. Une version simplifiée serait la bienvenue. La plus grande pertinence des modèles à plaques de mousse vient du fait que les analogies structurelles et fonctionnelles qu'ils proposent permettent d'établir facilement les correspondances entre le modèle et le réel. Ainsi, le coût cognitif réduit permet d'accéder à un gain informationnel supérieur à celui des autres modèles. Le rapport gain/coût est donc le plus élevé.

Ce dossier invite à une réflexion sur ce qu'est un modèle : ce n'est pas une copie du réel, mais une représentation qui prend en compte seulement quelques caractéristiques du réel. L'enseignant est donc confronté à un choix : Que faut-il conserver ? Que faut-il rejeter ? La réponse est prioritairement dictée par l'état des connaissances scientifiques. En second lieu, une sélection est faite en tenant compte de l'objectif pédagogique, du choix des compétences à mobiliser, etc.

La question de la balance gain/coût cognitif est, de mon point de vue, un facteur essentiel qui permet de guider ses choix. Les modèles à glissement frictionnel, particulièrement les modèles à plaques de mousse, sont particulièrement pertinents : le gain informationnel est élevé et l'effort cognitif requis est faible.

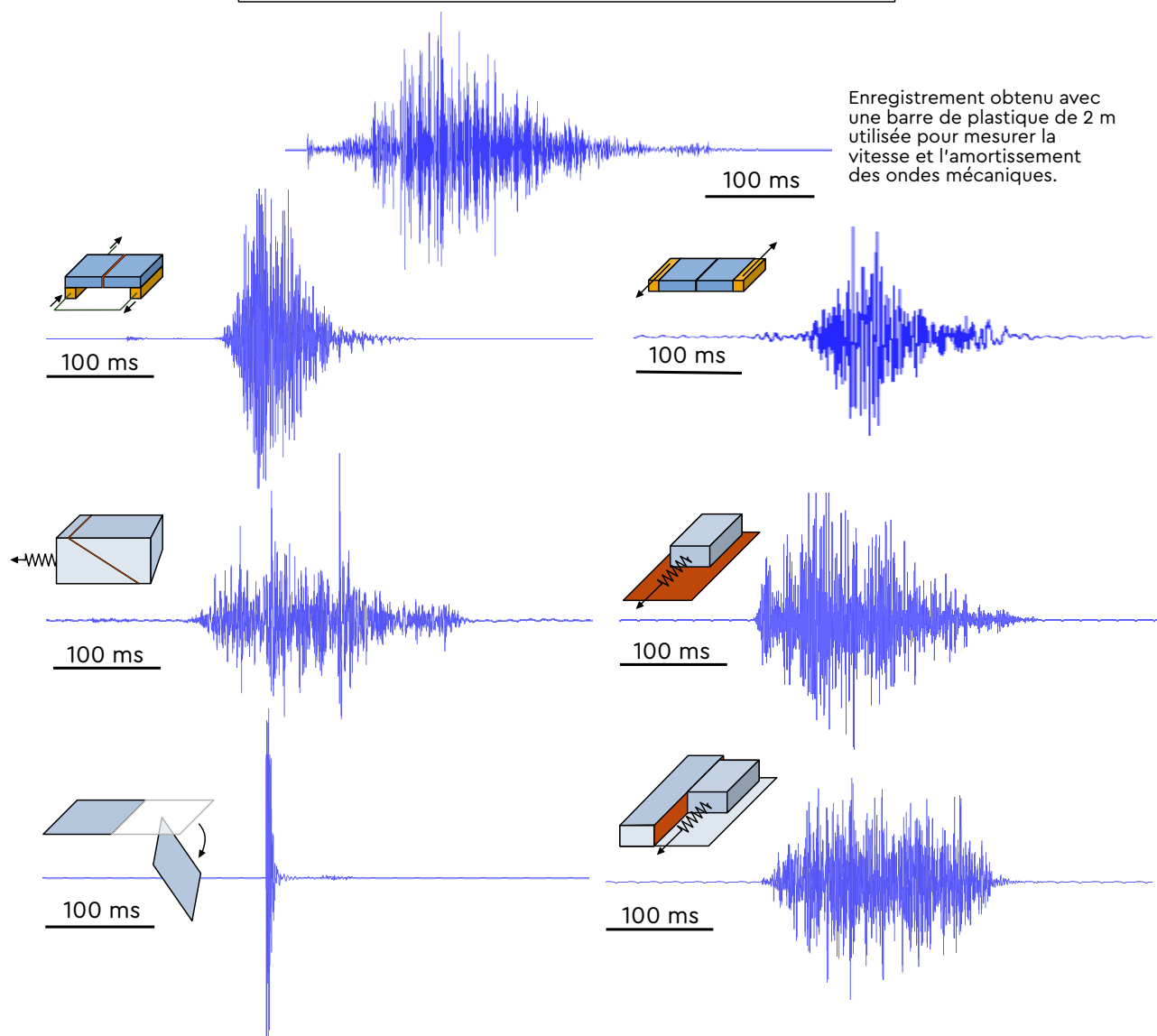
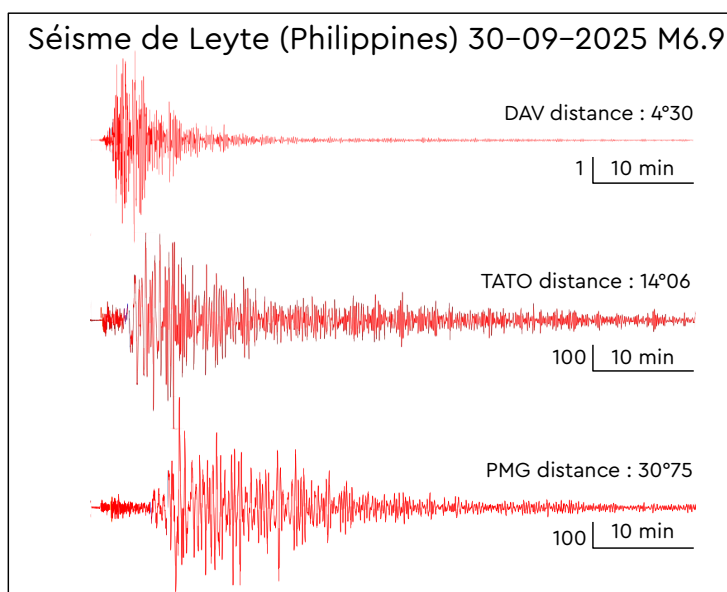
Faire évoluer nos pratiques demande de choisir son ou ses modèles en ayant à sa disposition les connaissances scientifiques nécessaires ainsi qu'un large choix de modèles.

Ce dossier plaide clairement pour les modèles à glissement frictionnel, et particulièrement pour la version simple du modèle à plaques de mousse. Mais la question des modèles analogiques reste ouverte : les discussions entre collègues et les nouvelles propositions sont les bienvenues.



ANNEXE 1 : Comparaison de sismogrammes réels et des "sismogrammes" des modèles

Cette confrontation réel/modèle permet de pointer une des limites du réalisme des modèles.



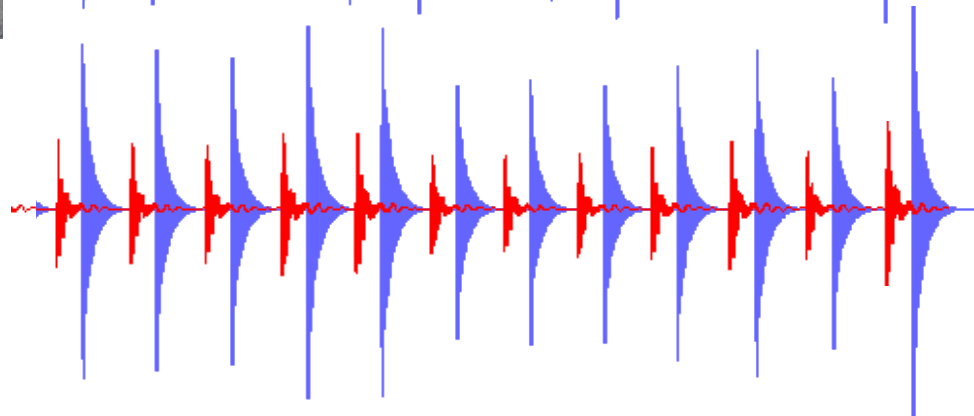
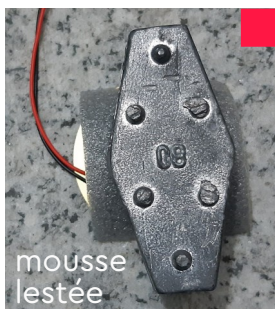
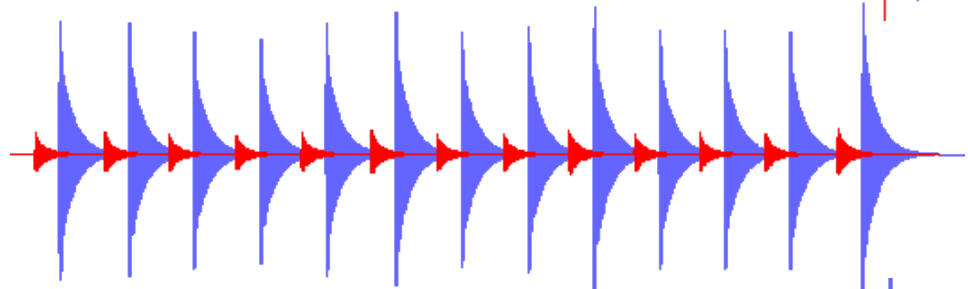
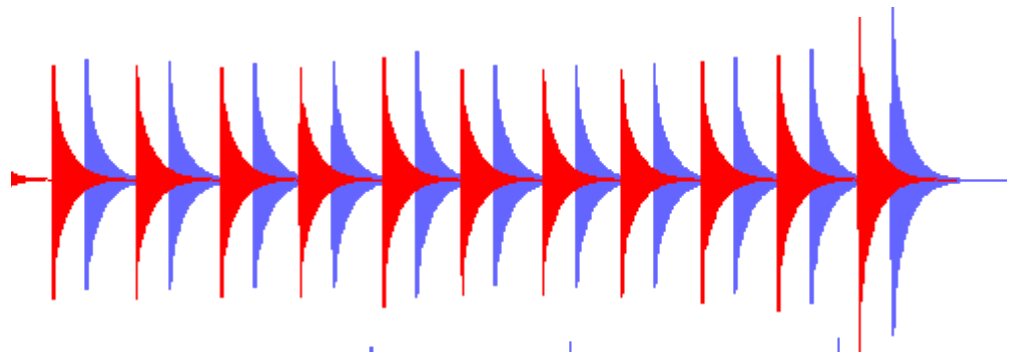
ANNEXE 2 : Fixation des capteurs piézoélectrique : J'ai testé trois types de fixation des capteurs piézoélectrique céramique-laiton ($\varnothing$ 35 mm) : boulette de pâte adhésive repositionnable, scotch et mousse lestée (masses de 20 à 190 g).

Protocole : Deux capteurs sont disposés aux extrémités d'une barre de granite. Le capteur de référence (BLEU) est fixé au support grâce à de la pâte adhésive, le capteur test (ROUGE) est fixé grâce à l'un des trois types de fixation. Un poinçon permet de générer un train de chocs au centre de la barre de roche. Les enregistrements des deux capteurs sont superposées et décalées temporellement.

Résultat : La fixation des capteurs à l'aide d'une pâte adhésive repositionnable améliore la qualité du signal. Cela s'explique probablement par le fait qu'ils peuvent vibrer plus librement, ce qui leur permet de générer un courant électrique de tension plus élevée.



barre de granite 51 × 10 × 5 cm

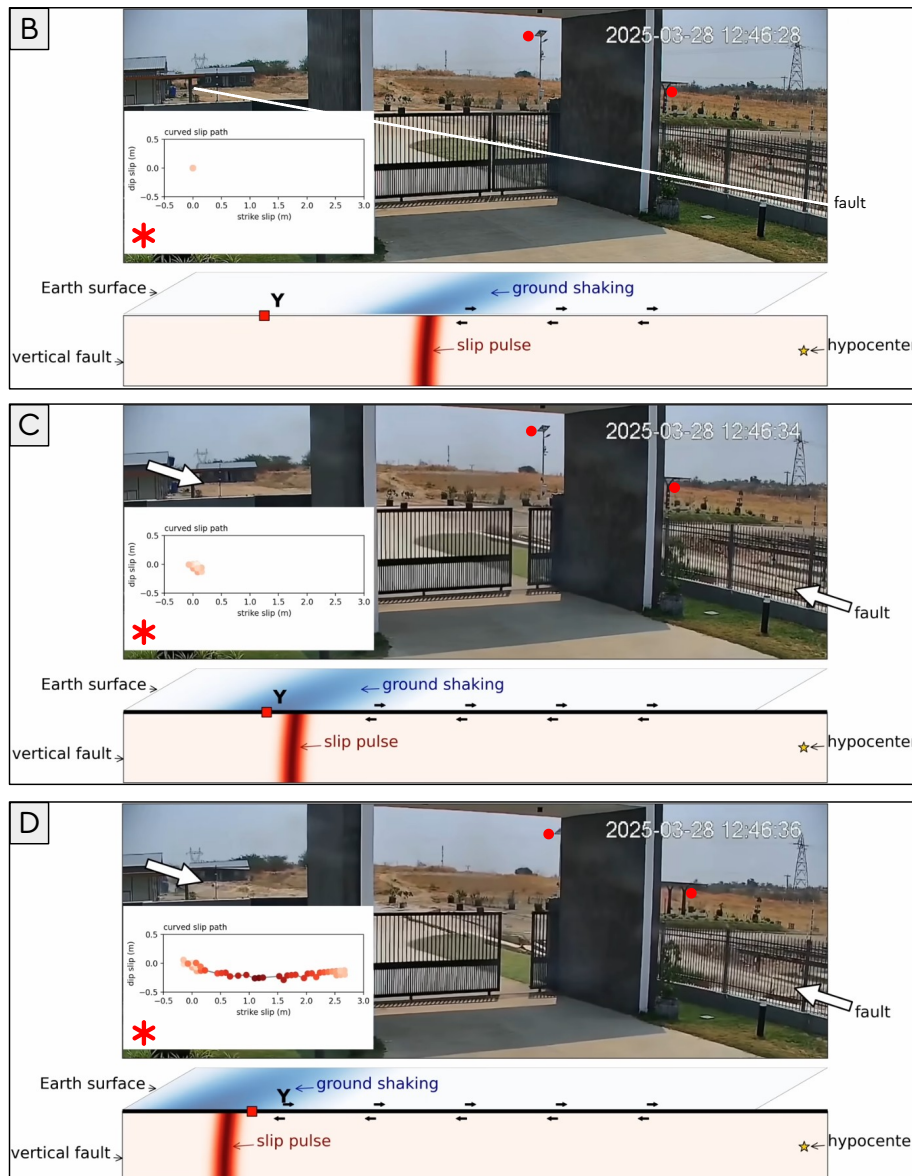
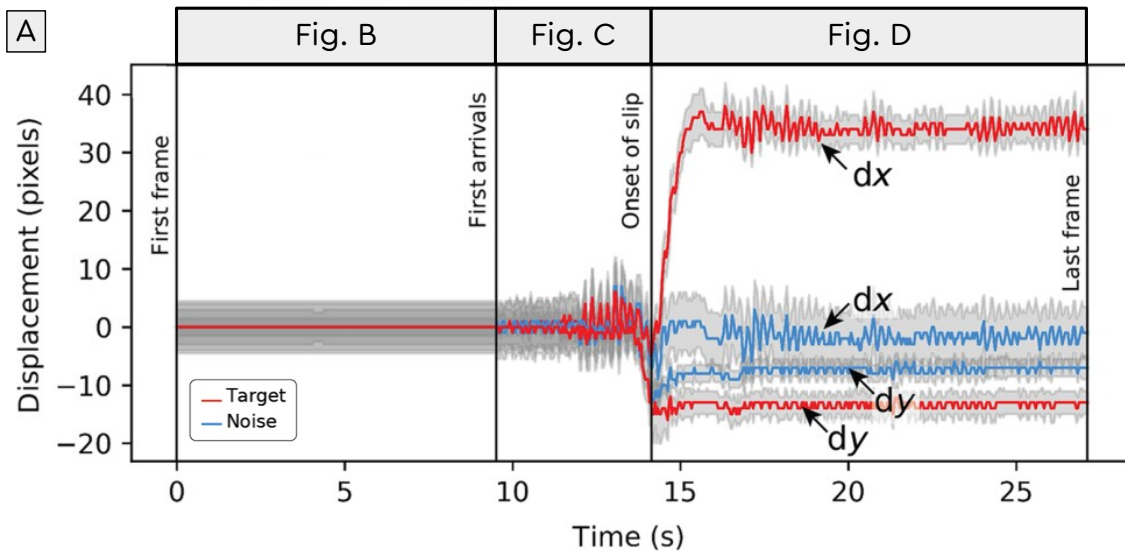


ANNEXE 3 : Exemple du séisme de Mandalay du 28 mars 2025

Curved Fault Slip Captured by CCTV Video During the 2025 M_w 7.7 Myanmar Earthquake

Jesse Kears^{1*} and Yoshihiro Kaneko¹

The Seismic Record
A journal of the
Seismological Society of America



Le séisme du 28 mars 2025 s'est produit le long de la faille de Sagaing.

« In this article, we overcome these challenges using closed-circuit television (CCTV) video footage of ground surface rupture during the 2025 moment magnitude (M_w) 7.7 Myanmar, earthquake, which provides **the first direct observation of surface fault slip in real time.** »

Le glissement observé à cet endroit, situé à 120 km au sud de l'hypocentre (voir la figure E), est d'une ampleur de $2,5 \pm 0,5$ m, avec un pic de vitesse du $3,2 \pm 1,0$ m/s.

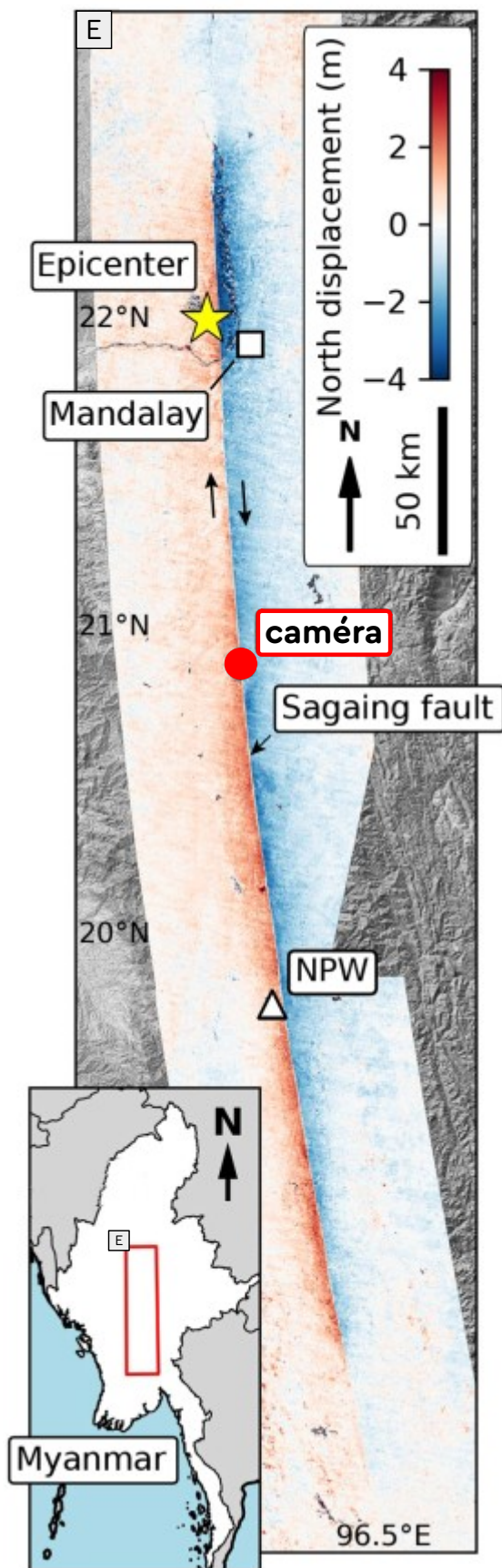


Figure A : Déplacement en pixels, selon l'axe x (bord horizontal de l'image) et selon l'axe y, (bord vertical de l'image). On peut découper la vidéo en trois séquences qui correspondent aux figures B, C et D. Les deux points rouges mettent en évidence le glissement.

Figure B : La première séquence se déroule avant l'arrivée des premières ondes sismiques générées par le glissement frictionnel. L'encadré marqué d'une étoile rouge permet de suivre le déplacement du carré rouge, selon l'axe x et y au cours du temps.

Figure C : La deuxième séquence correspond à l'arrivée des ondes sismiques qui précèdent le glissement.

Figure D : La troisième séquence montre que le déplacement dextre s'accompagne d'un déplacement verticale.

Figure E : La faille de Sagaing s'est rompu sur une distance de 400 km, avec un glissement qui a atteint plus de 6m. La forte magnitude et la longueur de rupture de la faille expliquent l'importance des dégâts (niveau X sur l'échelle de Mercalli) et le bilan de plus de 3600 morts.

Sources :

Kearse, J. and Y. Kaneko (2025). Curved Fault Slip Captured by CCTV Video During the 2025 Mw 7.7 Myanmar Earthquake, The Seismic Record. 5(3), 281–288, doi: 10.1785/ 0320250024.

Figures A et E : adaptées de Kearse (2025)

Figures B, C et D : adaptées de captures d'écran de la vidéo YouTube de Jesse Kearse (1 M vues)
<https://www.youtube.com/watch?v=dbEYe65eDdw>