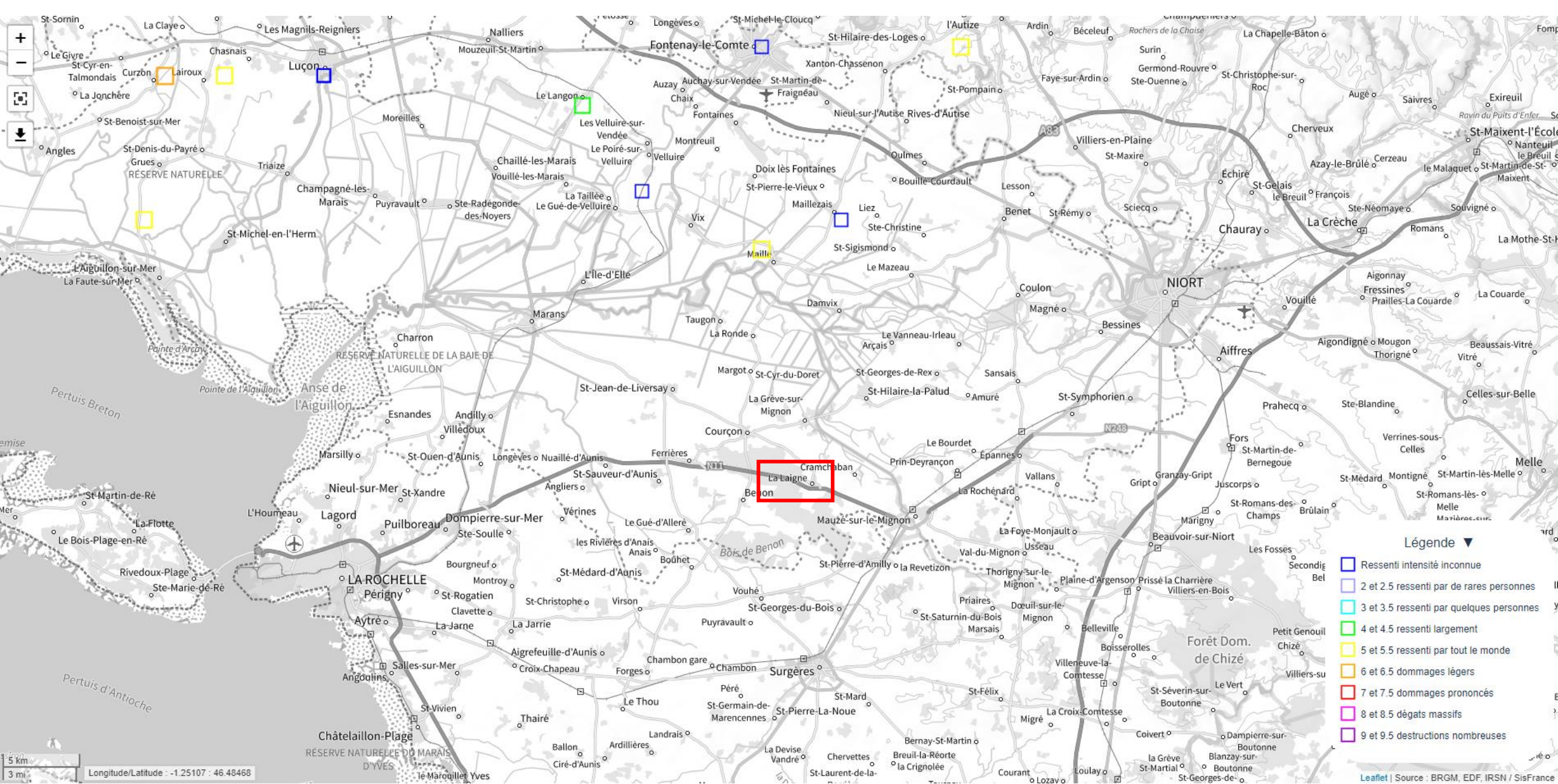


Le séisme de La Laigne du 16 juin 2023

Un tremblement de terre a secoué la Charente Maritime, les Deux Sèvres et la Vendée en fin d'après-midi le vendredi 16 juin dernier à 18h 38, heure locale. Il s'est produit à environ 25 km au Sud-Ouest de Niort et à 14 km au Nord / Nord-Ouest de Surgères, à proximité de La Laigne. Sa magnitude a été évaluée entre 4.8 et 4.9. Une réplique de magnitude 4 a été enregistrée à 4h 27 le lendemain. Les deux hypocentres ont été localisés à faible profondeur (3 km pour le premier, 1 km pour le second). De nombreuses répliques de plus faible magnitude ont été enregistrées durant les 24h suivant l'événement principal.



Localisation de l'épicentre du séisme de La Laigne du 16 juin 2023

Quelques caractéristiques du séisme

Type	Tremblement de terre
Magnitude	5.3 MLv
Date et heure locales	2023/06/16 18:38
Temps universel	2023/06/16 16:38
Latitude	46.20 ° ± 0.1 km
Longitude	-0.73 ° ± 0.1 km
Profondeur	3 km (from location) ± 0.3 km

Les faits

Dans la région recouvrant la Vendée, les Deux-Sèvres, la Charente maritime et la Charente, les séismes sont relativement fréquents (voir diapositive suivante).

Cela s'explique par la coexistence de deux grandes familles de failles :

- des failles de direction armoricaine N145 formées il y a environ 330 - 300 Ma lors de l'orogénèse varisque (ou hercynienne). Ce sont généralement des failles décrochantes ou transcurrentes à jeu dextre plus ou moins parallèles à la grande faille de Pouzauges - L'Absie - Saint-Maixent-L'École, qui passe à l'Est de notre département, la Vendée, et est bien visible dans le paysage, par exemple à Pouzauges,
- et des failles de direction N130 liées à la formation du rift de Gascogne à la fin du Jurassique supérieur, il y a environ 150 Ma. Ce sont des failles beaucoup moins bien connues que les précédentes parce que masquées par les dépôts du Jurassique et du Crétacé du Bassin Aquitain et plutôt normales, à regard Sud.

Aujourd'hui, ces deux familles de failles continuent à jouer à cause essentiellement de la remontée vers le Nord de la Plaque Africaine qui pousse devant elle la péninsule ibérique qui finalement vient heurter la Plaque Européenne.

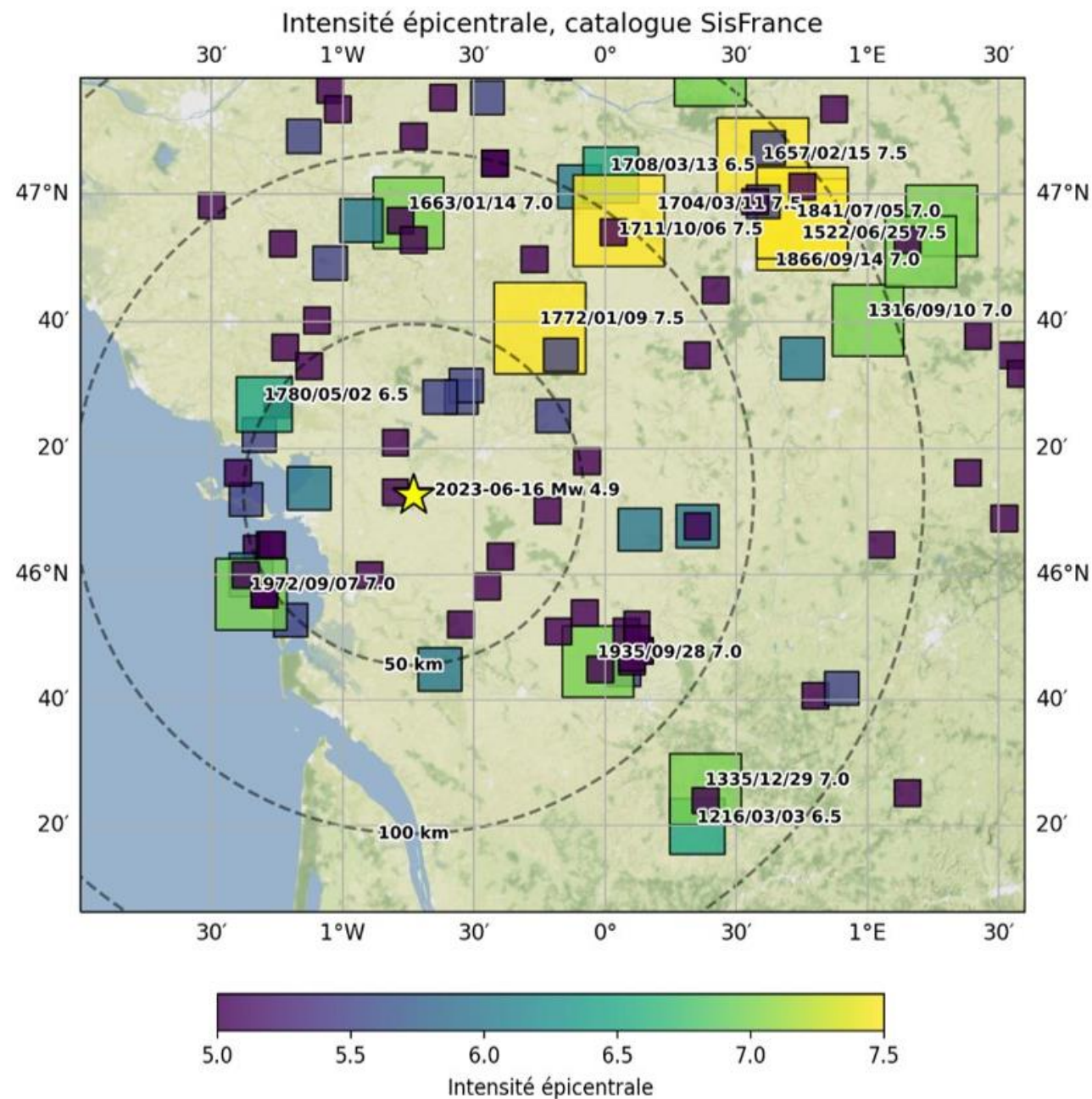
On peut penser légitimement que les failles de la première famille rejouent toujours en décrochement, mais peut-être senestre, qui sait ?, il est en revanche beaucoup plus difficile de savoir comment fonctionnent celles de la seconde famille : fonctionnent-elles toujours en tant que failles normales, ou, du fait de la remontée de la Péninsule Ibérique, en tant que failles inverses ?

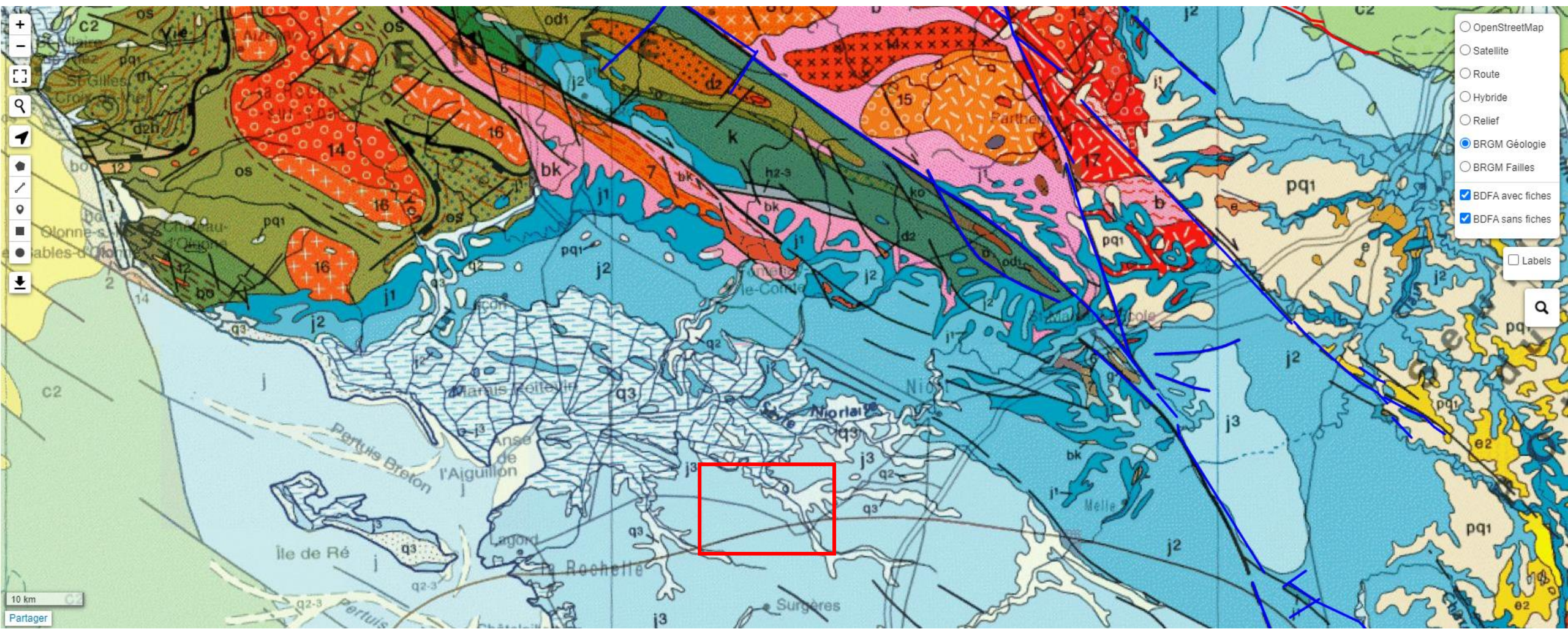
Problématique

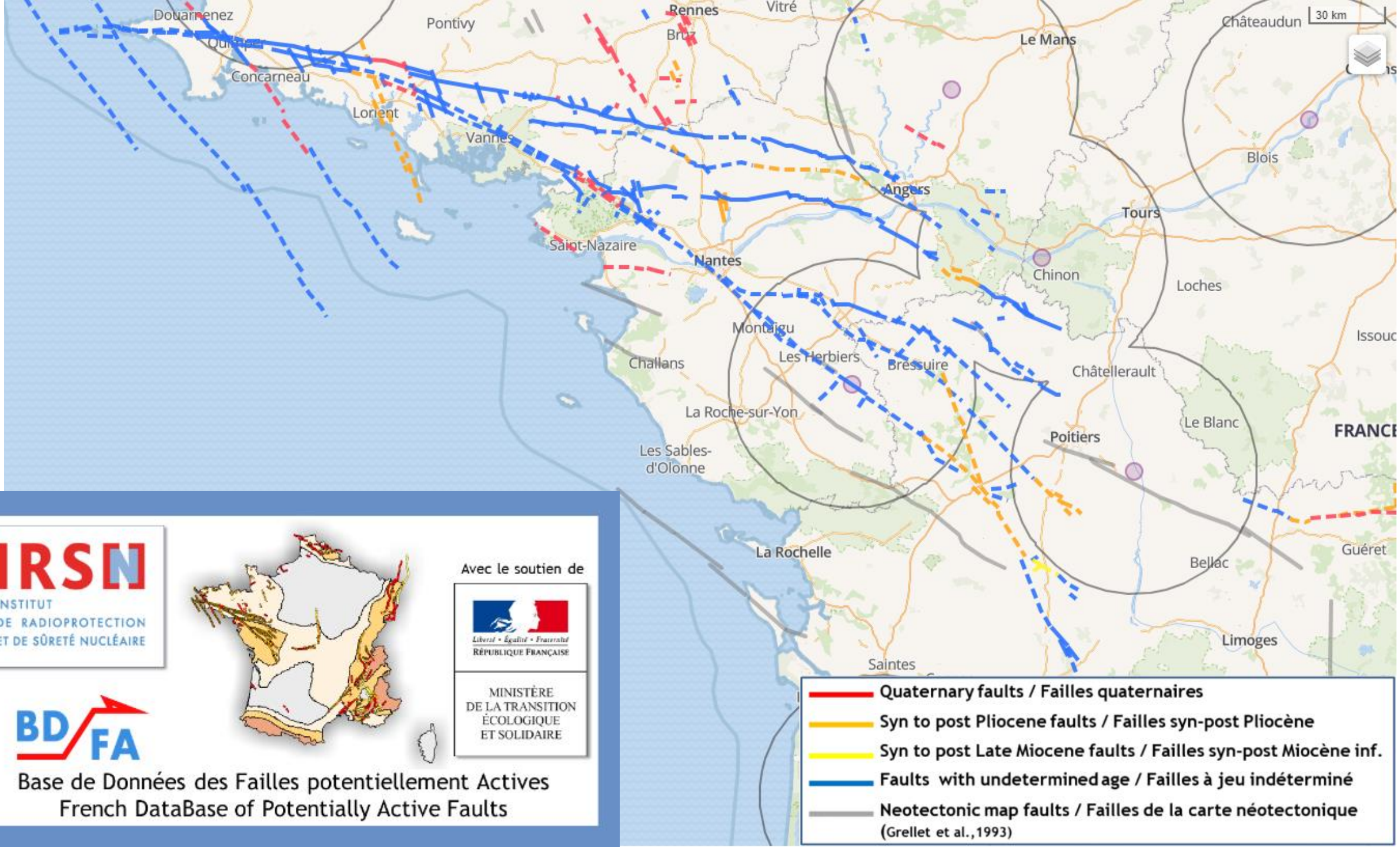
À laquelle de ces deux familles de failles faut-il rapporter le séisme de La Laigne ?

Parmi les séismes historiques de la région, les séismes du 7 septembre 1972 (à Oléron), du 6 octobre 1711 (à Loudun) et du 9 janvier 1772 (à Parthenay) ont atteint ou dépassé une intensité épicentrale de VII (dommages aux constructions).

Distribution des intensités macrosismiques épicentrales supérieures à V des séismes de la région (source SisFrance)





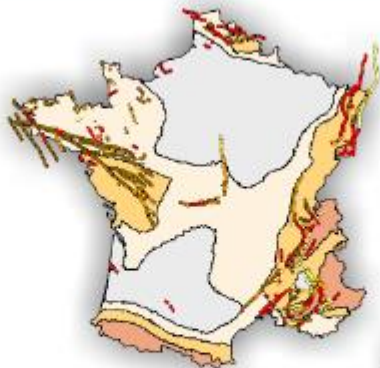


IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

**BD
FA**

Base de Données des Failles potentiellement Actives
French DataBase of Potentially Active Faults



Avec le soutien de



MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET SOLIDAIRE

- Quaternary faults / Failles quaternaires**
- Syn to post Pliocene faults / Failles syn-post Pliocène**
- Syn to post Late Miocene faults / Failles syn-post Miocène inf.**
- Faults with undetermined age / Failles à jeu indéterminé**
- Neotectonic map faults / Failles de la carte néotectonique (Grellet et al., 1993)**

Différents styles de failles dans le Massif Armoricain

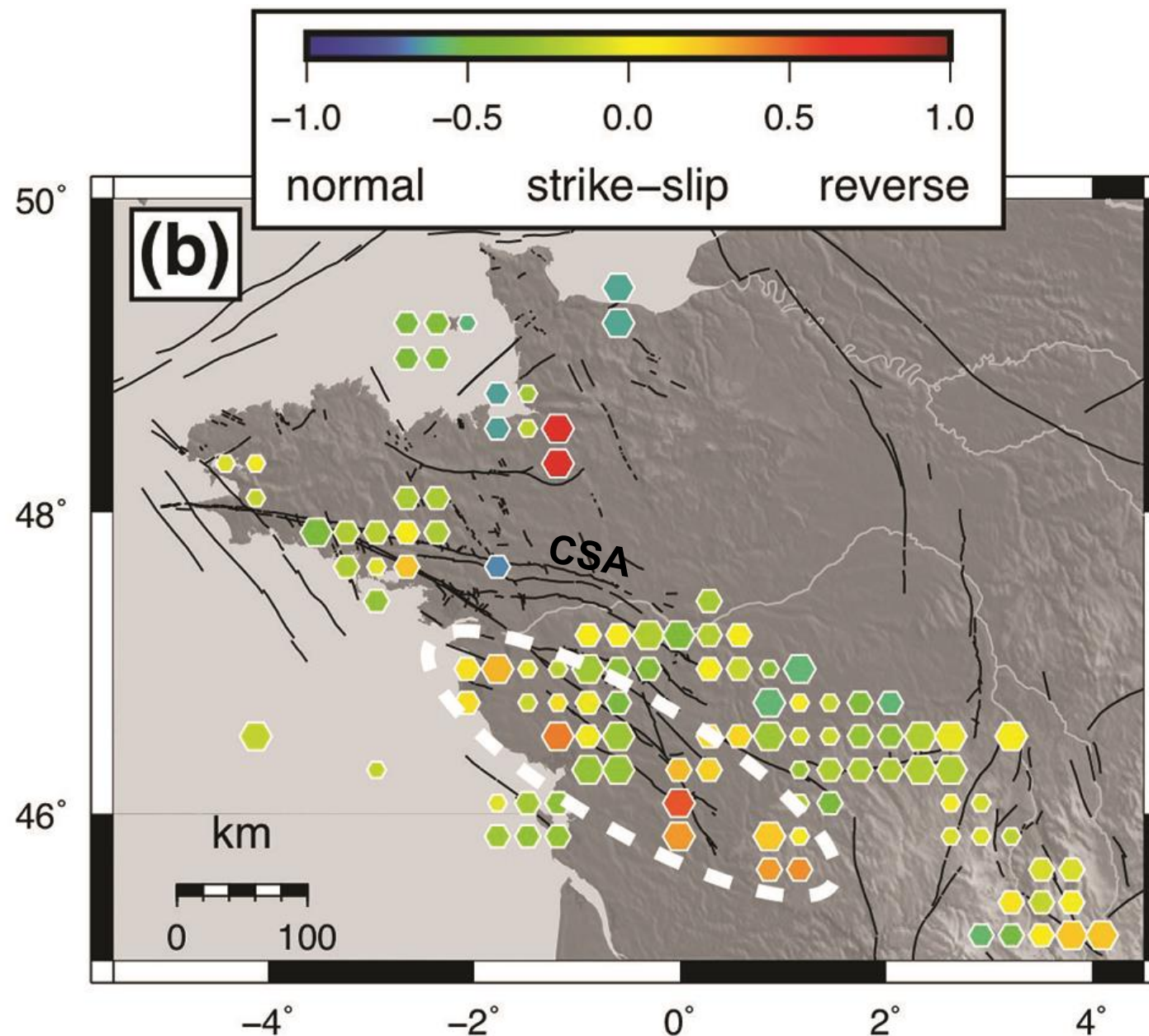
(BSGF - Earth Sciences Bulletin 2021, 192, 10)

Les lignes noires représentent les failles
potentiellement actives connues.

CSA = Cisaillement Sud-Armoricain

Légende

normal = faille normale
strike-slip = faille de décrochement
reverse = faille inverse



Quelques rappels du TP sur la structure du globe du 19 mars 2022

Pour répondre à la question, on va faire des petits rappels de la séance de TP du 19 mars 2022.

Déjà, comment a-t-on localisé l'épicentre du séisme ?

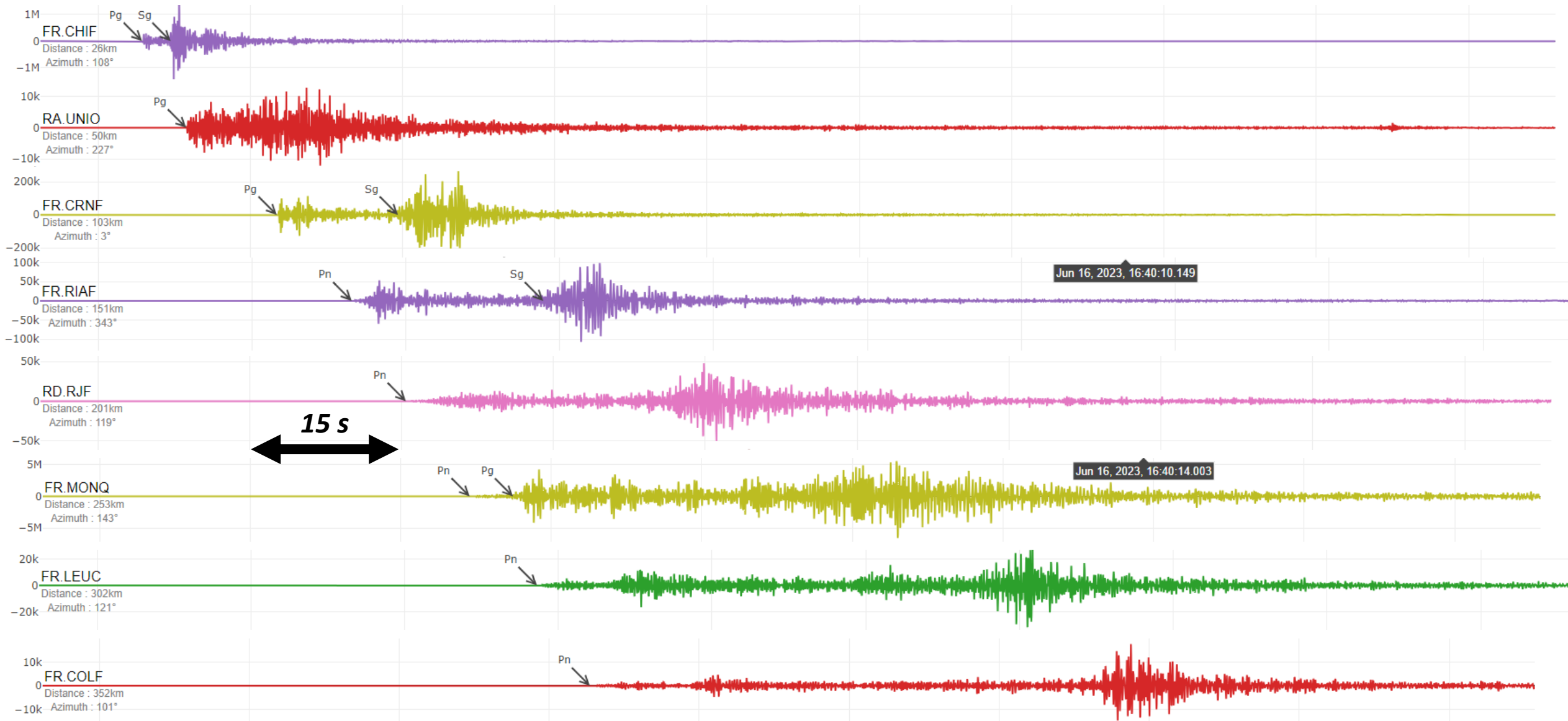
On a vu qu'on peut le faire à partir de sismogrammes enregistrés dans différentes stations et que dans la pratique, il suffit d'en exploiter trois.

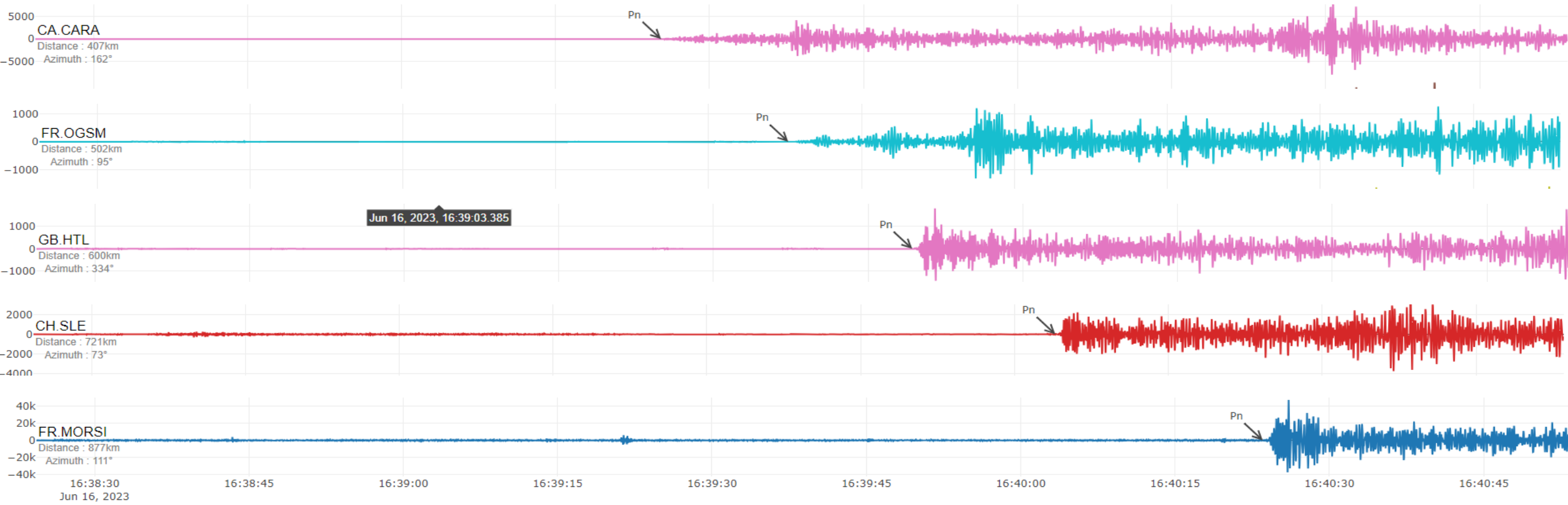
Pour cela, on mesure l'intervalle de temps séparant l'arrivée des ondes P, les plus rapides, de celle des ondes S, plus lentes sur chacun de ces trois enregistrements.

Puis les ayant déterminés, on exploite des abaques tout faits qui vont nous donner les distances épicentrales c'est-à-dire la distance séparant chaque station de l'épicentre du séisme.

Comment a-t-on localisé l'épicentre du séisme ?

Quelques sismogrammes enregistrés dans différentes stations lors du séisme de La Laigne





**Nom et localisation
des stations d'enregistrement**

FR.CHIF Chizé (79)	FR.LEUC Leucamp (15)
RA.UNIO Château d'Oléron (17)	FR.COLF Collanges (63)
FR.CRNF Coron (49)	CA.CARA Viehla (Espagne)
FR.RIAF Riaillé (44)	FR.OGSM Saint-Genix-les-villages (73)
RD.RJF Saint-Bonnet-L'enfantier (19)	GB.HTL Hartland (Devon - Angleterre)
FR.MONQ Montcuq (46)	CH.SLE Stühlingen (Allemagne - Frontière germano-suisse)
	FR.MORSI Morsiglia (Corse du Nord)

Sur la diapositive suivante qui présente le sismogramme vu en TP, cet intervalle de temps P-S est de 22 secondes (l'échelle des temps est représentée par tous les petits décrochements vers le bas que l'on voit bien alignés verticalement, deux décrochements successifs étant séparés d'une minute).

Réponse : Écart P-S = 22 s
Épicentre à 170 km

Bruit de fond

22 s

P

S

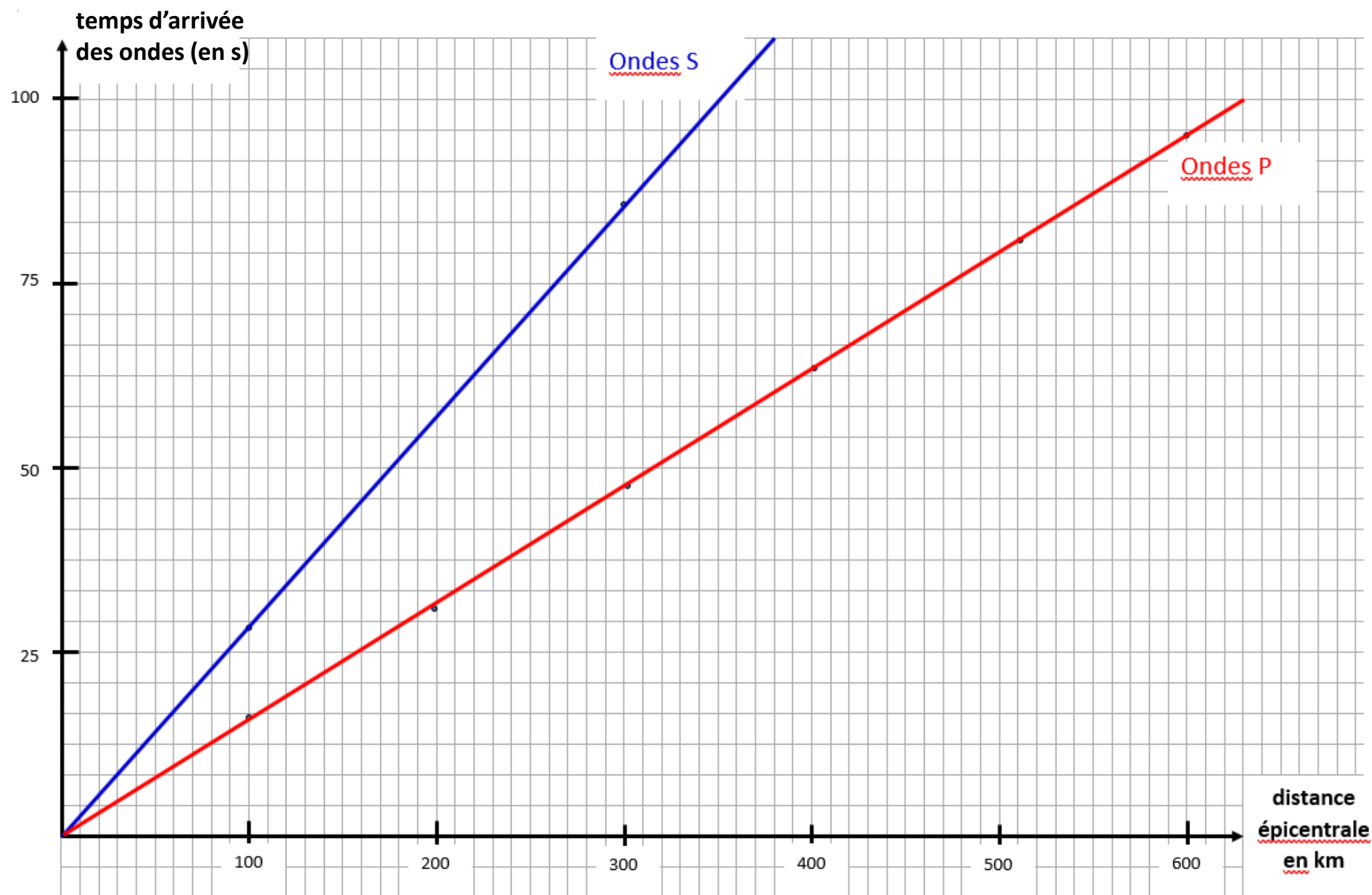
Sismogramme étudié

Sismogramme enregistré à Rognes (13)
le 10 octobre 1980 à 22h 35mn 07s
Composante verticale de la station.

1 minute

Quel est l'intérêt de la détermination de cet intervalle P-S ?
La construction et l'apport des hodochrones

Un exemple d'hodochrone



Comment construit-on un hodochrone ? Voir diapositive suivante

Supposons que les ondes P se propagent à une vitesse $V_p = 6 \text{ km/s}$ et que les ondes S se propagent deux fois moins vite $V_s = 3 \text{ km/s}$ pour que les calculs soient simples !

Si la station 1 est à une distance de 6 km du foyer, les ondes P vont arriver 1s après le séisme et les ondes S 2s après le séisme. On aura donc un écart P-S de 1s entre le temps d'arrivée des ondes P et celui des ondes S.

À la station 1, avant l'arrivée des ondes P, on va enregistrer le bruit de fond qui peut être dû au vent, à la mer, aux voitures qui circulent... Puis on enregistre les ondes P pendant le seconde suivante. Arrivent alors les ondes S qui vont ensuite « s'éteindre » progressivement.

écart P-S = 1s

À la station 2 située à une distance de 12 km, les ondes P vont arriver 2s après le séisme et les ondes S 4s après le séisme.

écart P-S = 2s

Et en 3, à une distance de 36 km du foyer, les ondes P arriveront 6s après le séisme et les ondes S 12s après.

écart P-S = 6s

Que constate-t-on ?

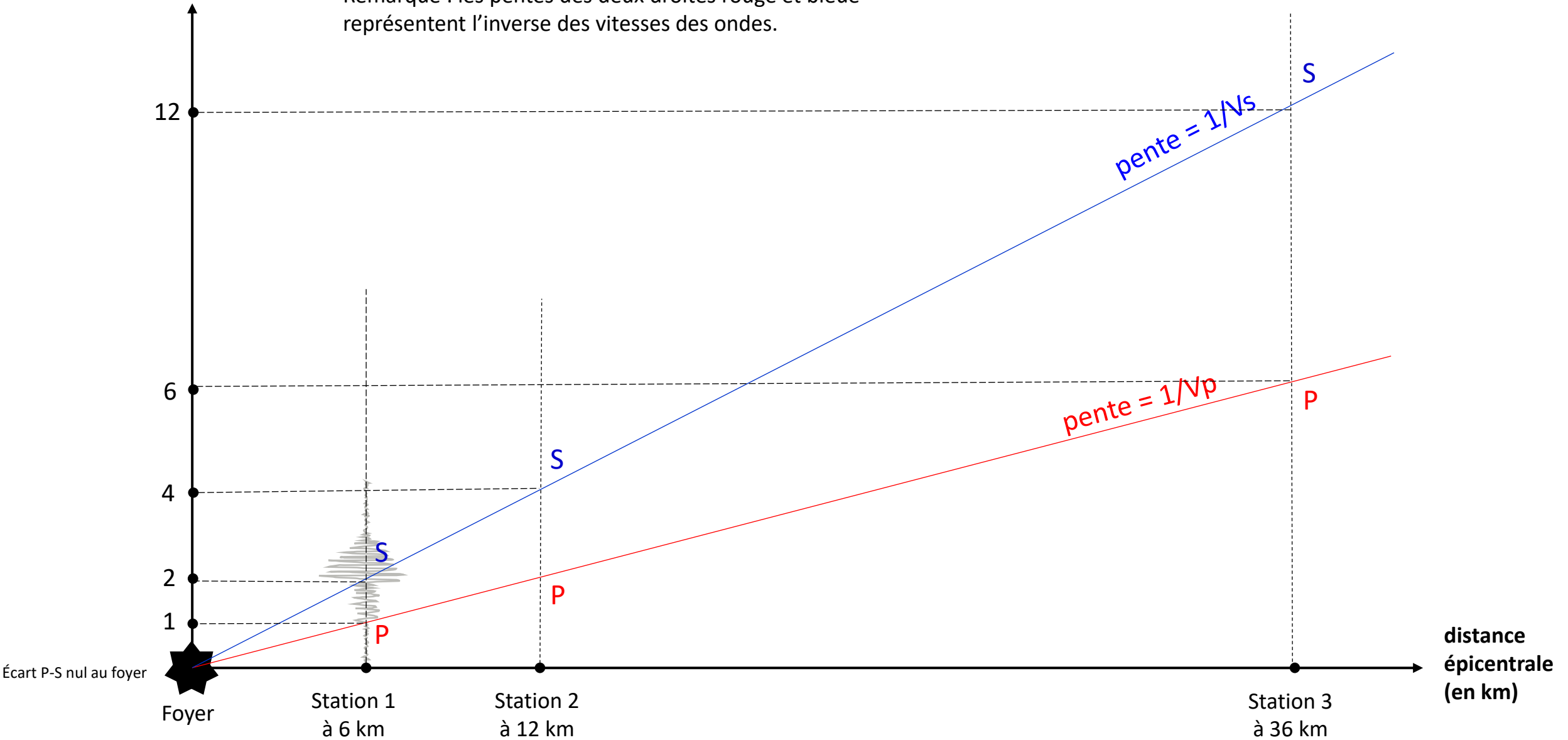
Plus la station est éloignée de l'épicentre du séisme et plus l'écart P-S est important.

On a donc là un moyen de déterminer la distance de la station à l'épicentre.

⇒ La détermination de l'écart entre l'arrivée des ondes P et celle des ondes S (on dit intervalle ou écart P-S) va donc permettre une mesure de la distance séparant la station d'enregistrement de l'épicentre ou « distance épicentrale ».

temps d'arrivée
des ondes (en s)

Remarque : les pentes des deux droites rouge et bleue
représentent l'inverse des vitesses des ondes.



On obtient deux droites qui passent par l'origine, lieu et moment du séisme. Les deux droites sont les hodochrones des ondes P et S.

Une droite passant par l'origine répond à l'équation : $y = ax$.

La pente « a » est égale à : y/x

y représente un temps (axe des ordonnées) et x une distance (axe des abscisses). La pente « a » est donc l'expression du rapport : temps / distance.

Or la vitesse est le rapport : distance / temps. On en déduit que la pente « a » des hodochrones est l'inverse de la vitesse.

La pente de la droite rouge est donc $1/V_p$ et la pente de la droite bleue $1/V_s$.

Arrivée des ondes P à une station située à la distance d : d/V_p

Arrivée des ondes S à la même station : d/V_s

$$\text{Écart P-S} = d/V_s - d/V_p = d \cdot (1/V_s - 1/V_p)$$

Et on constate alors que cet écart P-S ne dépend bien que de **d** et **des vitesses des ondes P et S**.

Or, ces ondes P et S se propagent dans le même milieu. Et si ce milieu est la croûte continentale granitique, on a alors :

$V_p = 6,3 \text{ km/s}$ et $V_s = 3,5 \text{ km/s}$ dans le granite.

$$\text{Écart P-S} = d \cdot [(1/3,5) - (1/6,3)]$$

$$\text{Écart P-S} = d \cdot 1/8 = d/8 \Rightarrow d = 8 \cdot (\text{écart P-S})$$

Sur l'abaque qui suit (diapositive suivante), on peut vérifier facilement cette relation.

Pour un écart de 10 s, $d = 80 \text{ km}$

Pour un écart de 90 s, $d = 720 \text{ km}$.

d (km)	Écart P-S (s)	d (km)	Écart P-S (s)	d (km)	Écart P-S (s)	d (km)	Écart P-S (s)	d (km)	Écart P-S (s)
0	0	160	20,000	320	40,000	480	60,000	640	80,000
10	1,250	170	21,250	330	41,250	490	61,250	650	81,250
20	2,500	180	22,500	340	42,500	500	62,500	660	82,500
30	3,750	190	23,750	350	43,750	510	63,750	670	83,750
40	5,000	200	25,000	360	45,000	520	65,000	680	85,000
50	6,250	210	26,250	370	46,250	530	66,250	690	86,250
60	7,500	220	27,500	380	47,500	540	67,500	700	87,500
70	8,750	230	28,750	390	48,750	550	68,750	710	88,750
80	10,000	240	30,000	400	50,000	560	70,000	720	90,000
90	11,250	250	31,250	410	51,250	570	71,250	730	91,250
100	12,500	260	32,500	420	52,500	580	72,500	740	92,500
110	13,750	270	33,750	430	53,750	590	73,750	750	93,750
120	15,000	280	35,000	440	55,000	600	75,000	760	95,000
130	16,250	290	36,250	450	56,250	610	76,250	770	96,250
140	17,500	300	37,500	460	57,500	620	77,500	780	97,500
150	18,750	310	38,750	470	58,750	630	78,750	790	98,750

Abaque donnant la distance (d) de la station d'enregistrement à l'épicentre du séisme en fonction de l'écart P-S

Exploitation des sismogrammes du séisme de La Laigne

Pour la détermination de l'épicentre du séisme du 16 juin, on peut s'appuyer sur les enregistrements (voir diapositive 10) des stations où les arrivées des ondes P et S qui se sont propagées dans la croûte granitique ont été repérées (Pg et Sg).

Donnée : Les traits verticaux gris léger du document sont séparés de 15 s.

Stations	Intervalle P - S (en s)	Distance de la station à l'épicentre (en km)
FR.CHIF Chizé (79)	~ 3	24
FR.CRNF Coron (49)	~13	104
FR.RIAF Riaillé (44)	~19	154

d (km)	Écart P-S (s)
0	0
10	1,250
20	2,500
30	3,750
40	5,000
50	6,250
60	7,500
70	8,750
80	10,000
90	11,250
100	12,500
110	13,750
120	15,000
130	16,250
140	17,500
150	18,750

Localisation de l'épicentre du séisme de La Laigne avec Google Earth Pro



Connaissant maintenant la distance de chaque station à l'épicentre, il suffit de tracer pour chaque station le cercle de rayon égal à la distance épicentrale correspondante.

Mode opératoire avec Google Earth Pro

On tape dans « Recherche » le nom de la station.

Puis on va à **Ajouter → Repère.**

Une mire clignotante apparaît à l'endroit de la station.

Dans la fenêtre qui s'ouvre, taper dans la ligne « nom » le nom de la station.

Dans le cadre dessous, aller dans « style, couleur ». Choisir la couleur pour la même couleur pour le libellé et pour l'icône.

Ne pas oublier de valider par « OK » à la fois pour le libellé et pour l'icône.

Puis aller dans **Outils → Règle.**

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « cercle ».

Placer la mire blanche qui apparaît sur la station. Puis l'écarter en faisant glisser la souris. Un cercle s'inscrit dont le rayon s'affiche dans la fenêtre. Ajuster le rayon à la valeur calculée. Puis valider en cliquant sur « enregistrer ».

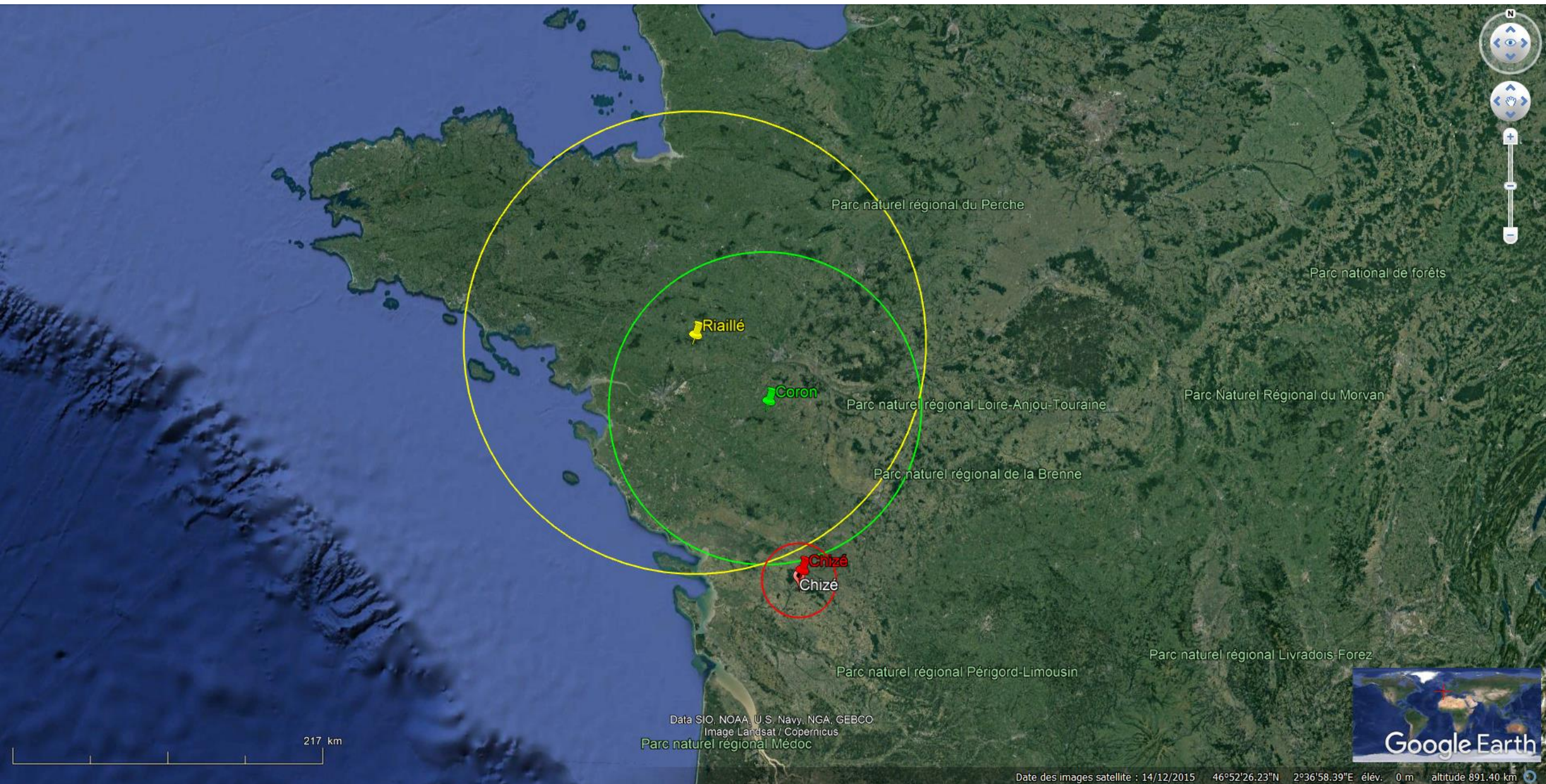
Dans la nouvelle fenêtre qui s'affiche, aller dans « style, couleur » et choisir la même couleur que plus haut.

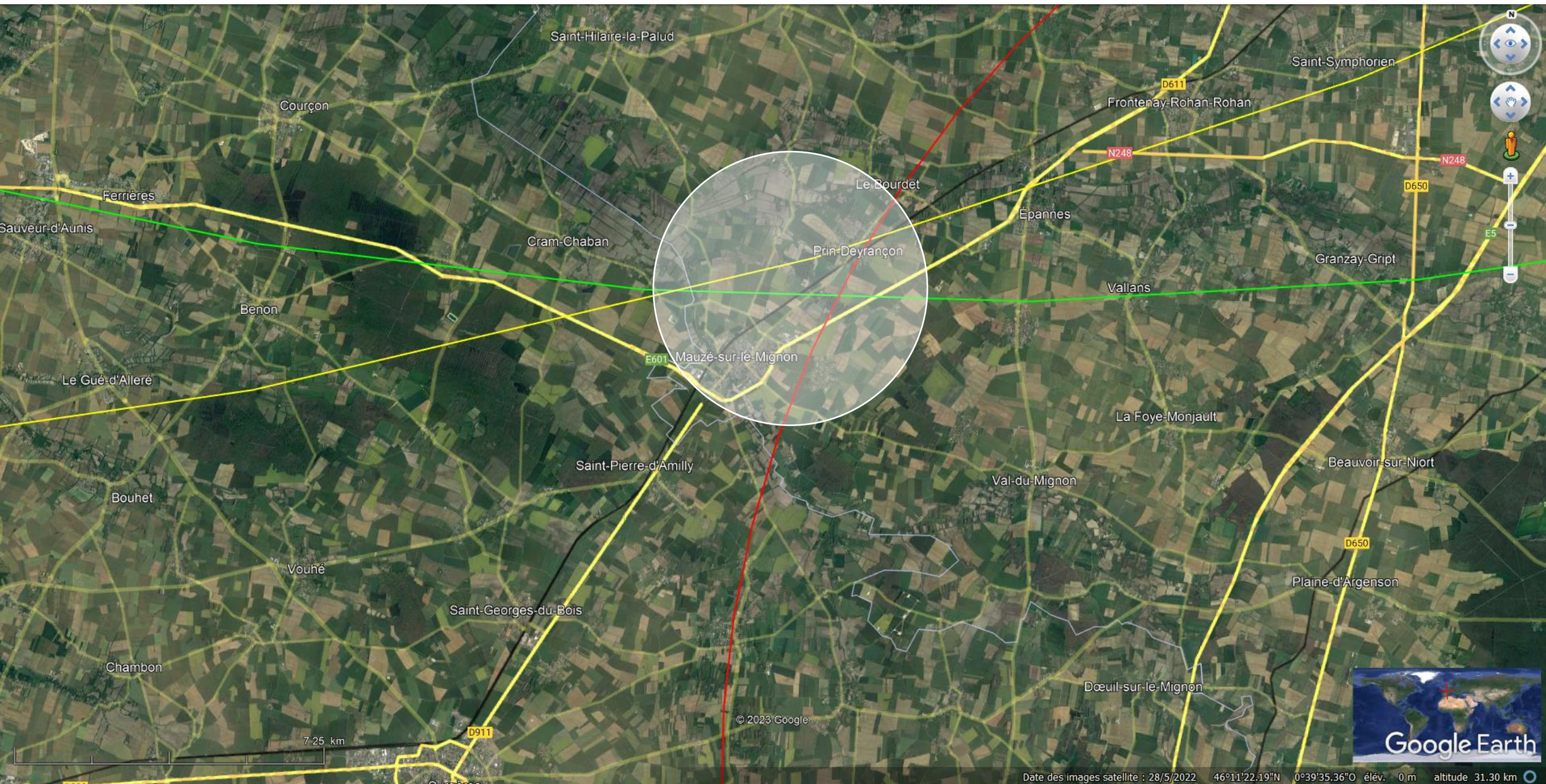
Et fermer la fenêtre en cliquant sur OK.

On renouvelle l'opération pour les deux autres stations.

L'intersection des trois cercles permet la localisation du séisme.

Le séisme du 16 juin a eu lieu près de Mauzé-sur-Le Mignon (17), pratiquement à la frontière avec le département des Deux-Sèvres.





© 2023 Google

Date des images satellite : 28/5/2022 46°11'22.19"N 0°39'35.36"E élév. 0 m altitude 31.30 km

Le séisme a donc eu lieu dans une zone habitée.

On aurait pu aussi localiser approximativement son épicentre en prenant en compte, après enquête, ses effets c'est-à-dire les dégâts produits sur les maisons, les bâtiments... ou le ressenti des personnes.

Les sismologues le font ! Pour évaluer le niveau de sévérité de la secousse sismique, ils ont établi de façon plus ou moins empirique des échelles d'intensité sismique.

Deux échelles d'intensité sont utilisées en France :

- l'échelle mise au point en 1964 par **Medvedev**, **Sponheuer** et **Karnik** dite échelle **MSK**,
- et l'échelle **EMS-98** pour **European Macroseismic Scale 1998**.

Le séisme de La Laigne a été largement ressenti par la population, comme rapporté par les témoignages internet récoltés sur le site du Bureau Central Sismologique Français (BCSF) – Figure 1. Le 16 juin 2023 au soir, l'intensité macrosismique maximale issue des témoignages est de VI (dégâts légers sur bâtiments vulnérables).

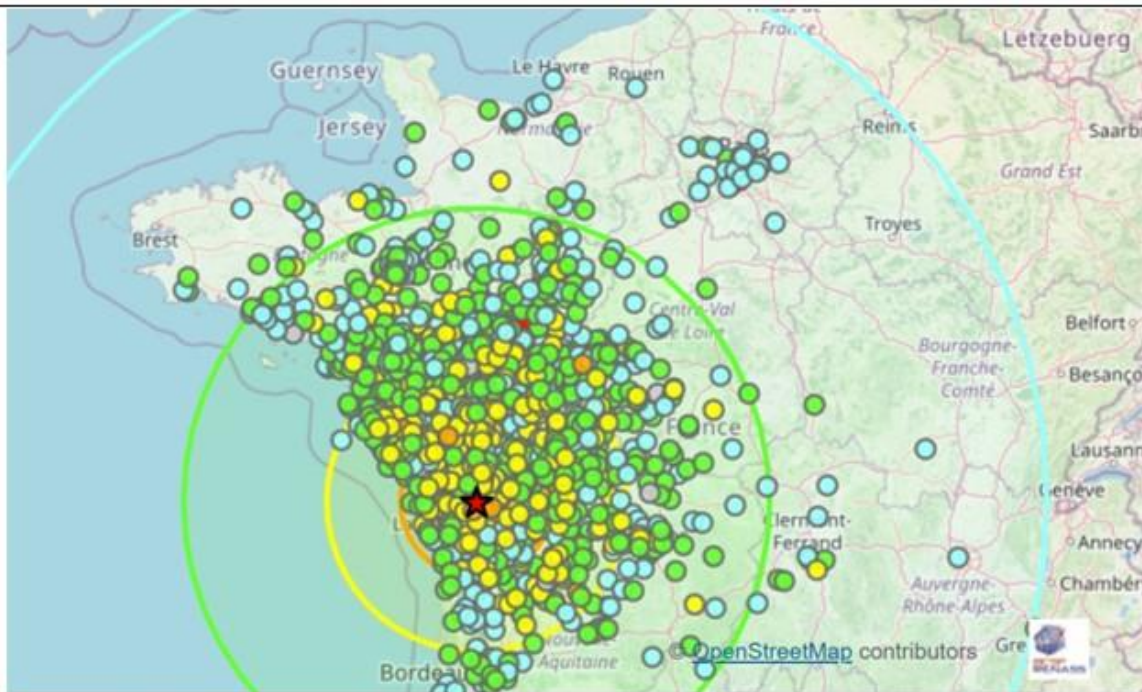
Échelle MSK

Echelle MSK

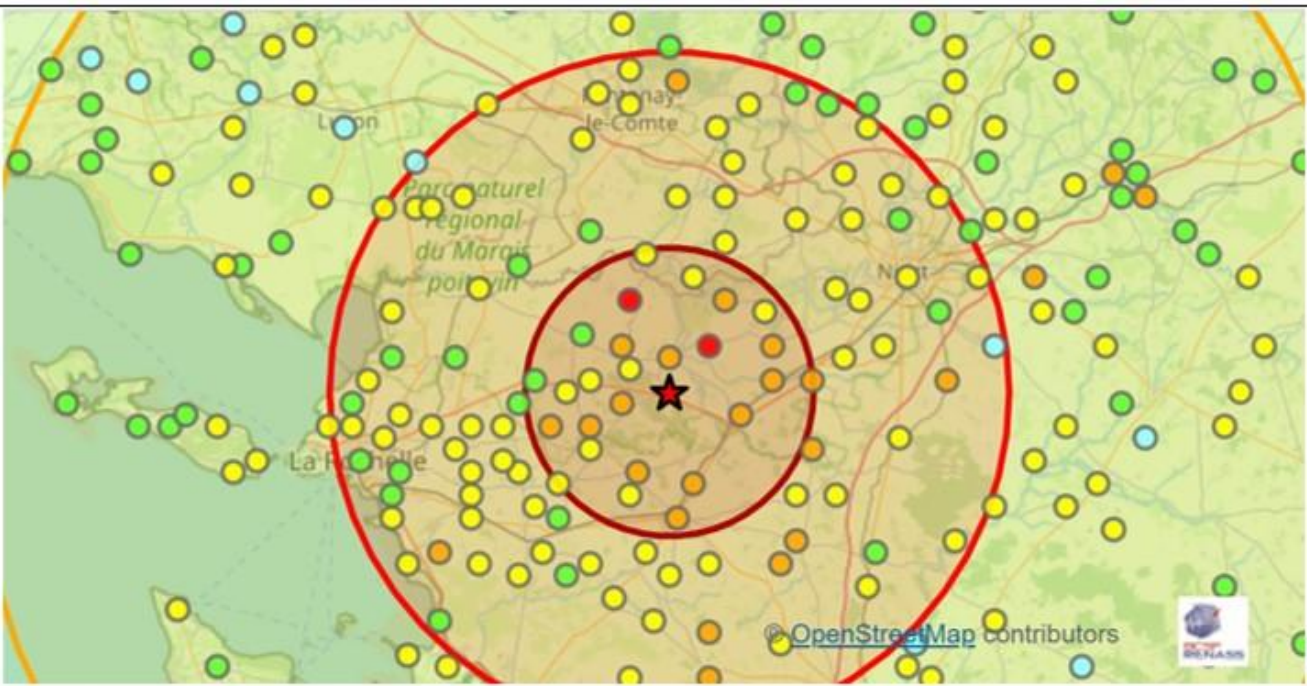
I	Secousse non ressentie mais enregistrée par les instruments (valeur non utilisée).
II	Secousse partiellement ressentie notamment par des personnes au repos et aux étages.
III	Secousse faiblement ressentie balancement des objets suspendus.
IV	Secousse largement ressentie dans et hors les habitations tremblement des objets.
V	Secousse forte réveil des dormeurs, chutes d'objets, parfois légères fissures dans les plâtres.
VI	Dommages légers parfois fissures dans les murs, frayeur de nombreuses personnes.
VII	Dommages prononcés larges lézardes dans les murs de nombreuses habitations, chutes de cheminées.
VIII	Dégâts massifs les habitations les plus vulnérables sont détruites, presque toutes subissent des dégâts importants.
IX	Destructions de nombreuses constructions quelquefois de bonne qualité, chutes de monuments et de colonnes.
X	Destruction générale des constructions même les moins vulnérables (non parasismiques).
XI	Catastrophe toutes les constructions sont détruites (ponts, barrages, canalisations enterrées...).
XII	Changement de paysage énormes crevasses dans le sol, vallées barrées, rivières déplacées.

I	Imperceptible
II	À peine ressenti. Ressenti seulement par quelques rares personnes au repos dans leurs habitations.
III	Faible. Ressenti par quelques personnes à l'intérieur des bâtiments. Les personnes au repos ressentent une oscillation ou un léger tremblement.
IV	Largement ressenti. Ressenti par de nombreuses personnes à l'intérieur des bâtiments, par quelques rares personnes à l'extérieur. Quelques personnes endormies sont réveillées. Les fenêtres, les portes et la vaisselle font un bruit de tremblement.
V	Fort. Ressenti par la plupart des personnes à l'intérieur des bâtiments, par quelques personnes à l'extérieur. De nombreux dormeurs sont réveillés. Quelques personnes sont effrayées. Les bâtiments tremblent dans toute leur structure. Les objets suspendus oscillent nettement. Les petits objets sont déplacés. Les portes et les fenêtres s'ouvrent ou se ferment.
VI	Dégâts légers. De nombreuses personnes sont effrayées et se précipitent à l'extérieur des bâtiments. Quelques objets tombent. Quelques maisons subissent de légers dégâts non structuraux (fissures à peine visibles, chute de petits morceaux de plâtre).
VII	Dégâts. La plupart des personnes sont effrayées et se précipitent à l'extérieur des bâtiments. Le mobilier est déplacé et les objets tombent des étagères en grand nombre. De nombreux bâtiments bien construits subissent des dégâts modérés (fissures dans les murs, chutes de plâtre, chutes partielles de cheminées). Dans les bâtiments plus anciens les murs sont fissurés et les cloisons sont endommagées.
VIII	Dégâts importants. De nombreuses personnes éprouvent des difficultés à se tenir debout. Les murs de nombreuses maisons sont crevassés. Dans quelques bâtiments bien construits, les murs sont endommagés, tandis que d'autres bâtiments plus anciens s'effondrent partiellement.
IX	Destructeur. Panique générale. De nombreuses constructions s'effondrent. Même les bâtiments bien construits présentent des dégâts très importants (murs endommagés et effondrement partiel des structures).
X	Très destructeur. De nombreux bâtiments bien construits s'effondrent.
XI	Catastrophe. La plupart des bâtiments bien construits s'effondrent. Quelques bâtiments construits selon les règles parasismiques sont détruits.
XII	Catastrophe complète. Presque tous les bâtiments sont détruits.

**Échelle d'intensité EMS 98 (simplifiée) utilisée par le BCSF
(Bureau Central Sismologique Français) depuis 2000**



Carte d'intensités internet issue de 4488 témoignages (Date de création : 16/06/2023 20:29 T.U.)



Carte d'intensités internet issue de 4488 témoignages (Date de création : 16/06/2023 20:29 T.U.)

Intensités EMS98*		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X, XI, XII
dégâts potentiels	bâtiments vulnérables	aucun	aucun	aucun	aucun	très légers	modérés	quelques effondrements partiels	nombreux effondrements partiels	nombreux effondrements	effondrements généralisés
	bâtiments peu vulnérables	aucun	aucun	aucun	aucun	aucun	aucun	très légers	modérés	effondrements partiels	effondrements nombreux à généralisés
perception humaine		non ressenti	très faible	faible	modérée	forte	brutale	très brutale	sévère	violente	extrême

- Localisation du séisme
- Intensité moyenne communale issue des témoignages internet (donnée préliminaire)
- niveau d'intensité théorique attendu sur la zone

Données macrosismiques : BCSF-RENASS (EOST-UMS830 / CNRS-Université de Strasbourg)
 *EMS-98 : Grunthal, G., 1998. European Macroseismic Scale 1998. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Sismologie.

Une fois l'épicentre du séisme localisé, il nous faut répondre à la problématique.

Problématique :

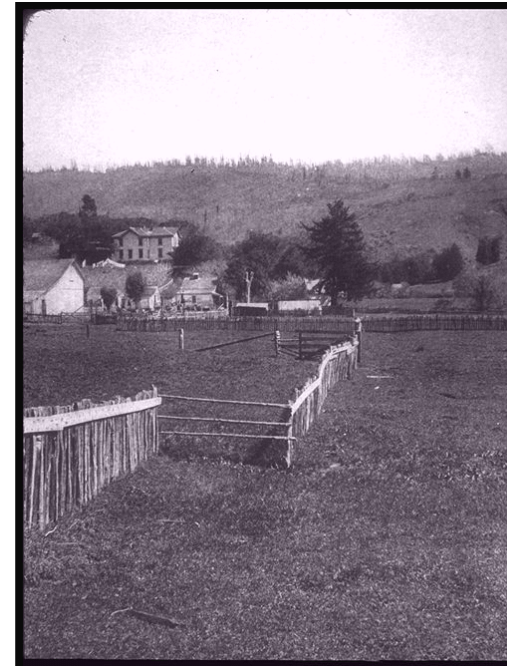
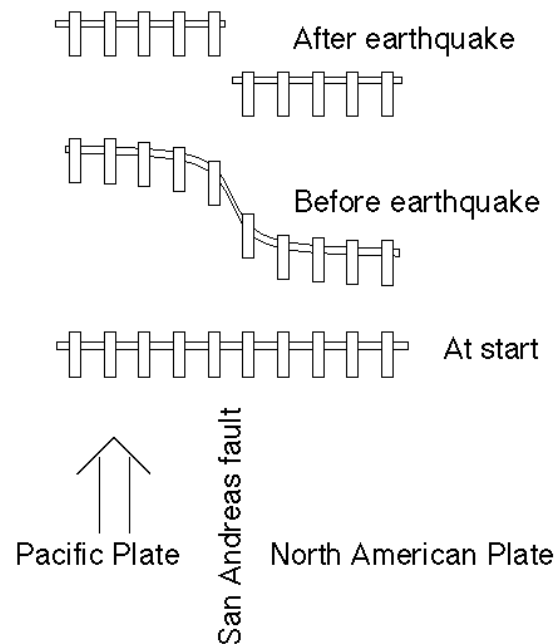
À laquelle des deux familles de failles qui se manifestent dans la marge Sud du Massif Armoricaire faut-il rapporter le séisme de La Laigne ?

Et questions subsidiaires :

- Les failles décrochantes (ou transcurrentes ou de coulissage) varisques N145 liées à la branche Sud du CSA fonctionnent-elles en dextre ou senestre ?
- Les failles liées au rift de Gascogne N130 fonctionnent-elles en tant que failles normales ou inverses ?

Analyse du séisme de La Laigne - Étude du mécanisme au foyer

La théorie du rebond élastique de Harry Fielding Reid (1910)



Document USGS - Earthquake 1906

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/vents/1906calif/18april/reid.php>

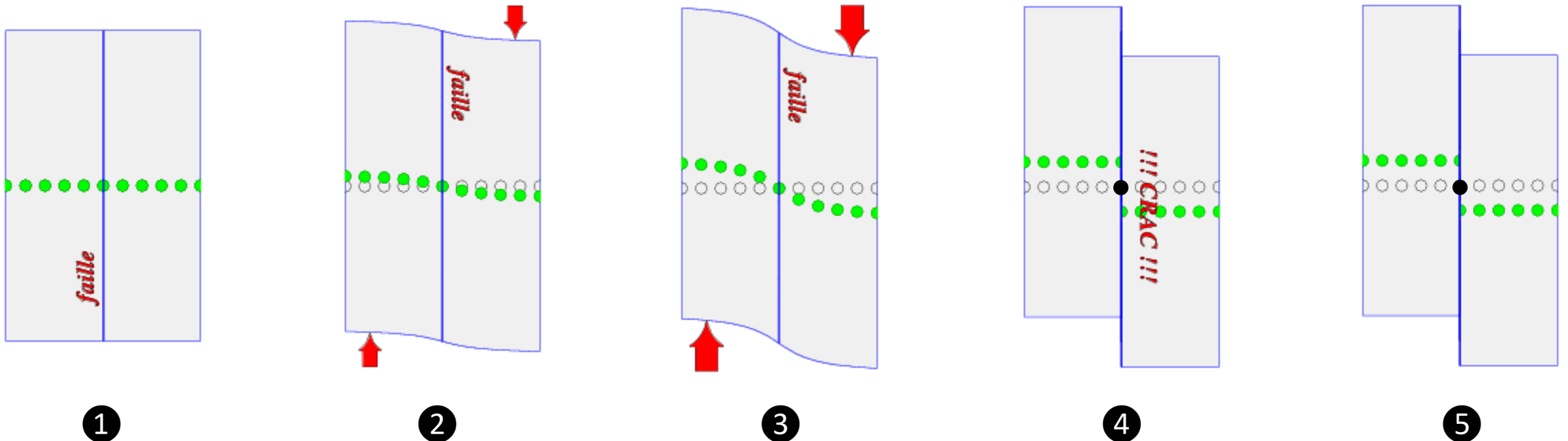
Pour aborder le problème, nous allons faire appel à la **théorie du rebond élastique** qui a été développée en 1910 par le géodésien californien Harry Fielding Reid à la suite de l'observation des effets du séisme de 1906 à San Francisco.

Ce séisme s'est produit au niveau de la fameuse faille de San Andreas, faille verticale décrochante (ou de coulissage) dextre à la frontière entre les plaques Pacifique et Nord-Américaine .

La suite des schémas de dessous représente le cycle des phénomènes qui se sont produits.

La trace de la faille verticale sur la surface horizontale du sol est figurée en bleu et imaginons une haie, en vert, la traversant perpendiculairement ❶. Avant le séisme, du fait de la contrainte imposée par le déplacement des deux plaques pendant des milliers d'années, les roches du sous-sol se déforment de façon élastique et la haie prend progressivement une forme sigmoïde qui s'accroît avec le temps ❷ et ❸. Puis brusquement, au moment du séisme, les roches cassent le long de la faille ❹ et toute l'énergie potentielle qu'elles ont accumulée est alors instantanément libérée sous la forme d'ondes sismiques qui se propagent dans toutes les directions à partir du foyer. La haie, au départ unique, est désormais divisée en deux segments décalés de part et d'autre de la faille ❺.

Remarque : Ce décalage a été de l'ordre de 2 à 3 m au niveau lors du séisme de 1906.



Essayons maintenant de voir de façon simple et un peu plus en détail ce qui se passe sous la surface du sol en remplaçant la haie par une règle plate en plexiglass disposée perpendiculairement au sol et au plan de la faille. On va utiliser une règle en plexiglass parce que les roches ont un comportement plastique comme la règle.

Quand la règle est dans la position ❶, on peut intuitivement diviser l'espace en **4 quadrants : de I à IV** délimités par la règle et le plan de la faille.

Ces deux plans sont appelés **plans nodaux**. Le plan de la faille est le **plan nodal principal** et la règle, le **plan nodal auxiliaire**.

❑ Situation avant le séisme

Une faille n'est jamais unique. La faille de San Andreas est un ensemble de failles plus petites qui se relaient, souvent en baïonnette. Et le plan d'une faille n'est jamais lisse sur toute sa longueur ce qui implique que certaines parties peuvent glisser de façon continue tandis que d'autres, normalement immobiles, cèdent de façon saccadée et brutale.

Quand les plaques se déplacent du bas vers le haut (de IV vers I sur la diapositive suivante) à gauche ou du haut vers le bas (de II à III) à droite, elles peuvent rencontrer un obstacle, être freinées.

Des contraintes représentées par les flèches rouges s'exercent alors sur la règle. Et comme celle-ci est soumise à un couple de forces opposées, elle se déforme progressivement et prend une allure sigmoïde comme représentée par les positions ❷ et ❸.

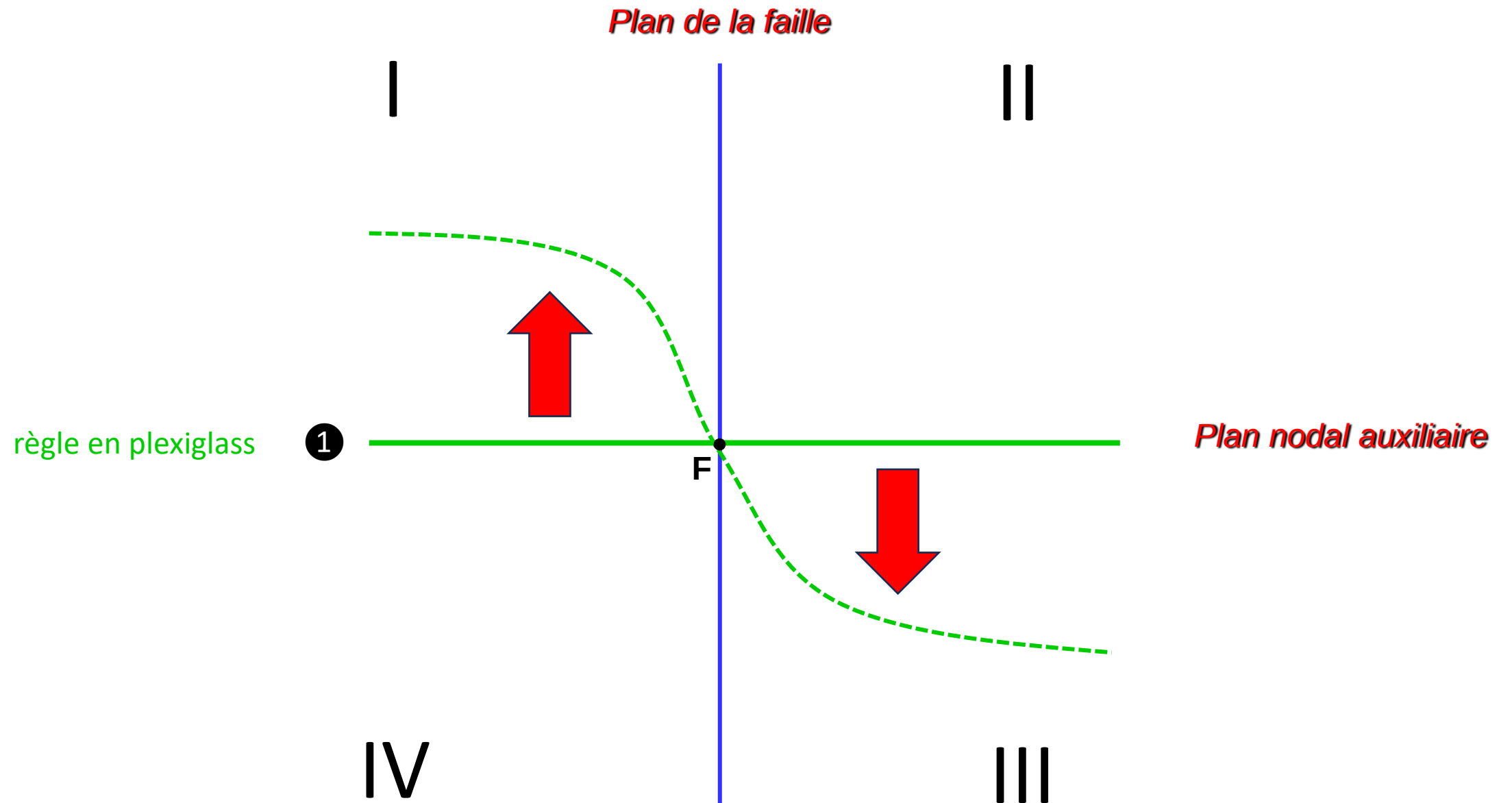
Cela signifie que les roches du quadrant I sont en compression. Elles sont comprimées par le fait que le quadrant IV se déplace vers le quadrant I à gauche de la faille à une vitesse voisine de celle du déplacement des plaques lithosphériques, c'est-à-dire de l'ordre de quelques cm par an. Et parallèlement, elles accumulent de l'énergie.

Et il en est de même de l'autre côté de la faille décrochante. Les roches du quadrant III sont elles aussi en compression et accumulent de l'énergie.

En revanche, les deux autres quadrants, II et IV, eux, sont en dilatation.

Deux quadrants sont donc en compression (I et III) et deux en dilatation (II et IV), symétriques deux à deux par rapport à F, le futur foyer du séisme.

Par convention, les compartiments en compression sont notés (+) et les compartiments en dilatation (-).



❑ Situation au moment du séisme

Quand brusquement le séisme a lieu et que les roches cassent au foyer, en F (c'est la règle qui casse !), les deux morceaux de règle vont venir aux positions indiquées en ⑤.

Dans le quadrant I, le mouvement brusque et instantané de la règle représenté par la flèche violette va pousser la matière de la zone grisée vers le haut. Cette matière va donc s'éloigner du foyer et aller vers les stations d'enregistrements situées à la surface du sol dans le quadrant I. La première onde P qui va partir du foyer sera une onde P en compression.

En revanche, sous la règle et toujours au niveau du foyer, il se crée comme un vide puisque de la matière est partie. Et comme la nature a horreur du vide, de la matière venant du quadrant IV va venir instantanément le combler. Dans le quadrant IV, de la matière va donc se déplacer en direction du foyer.

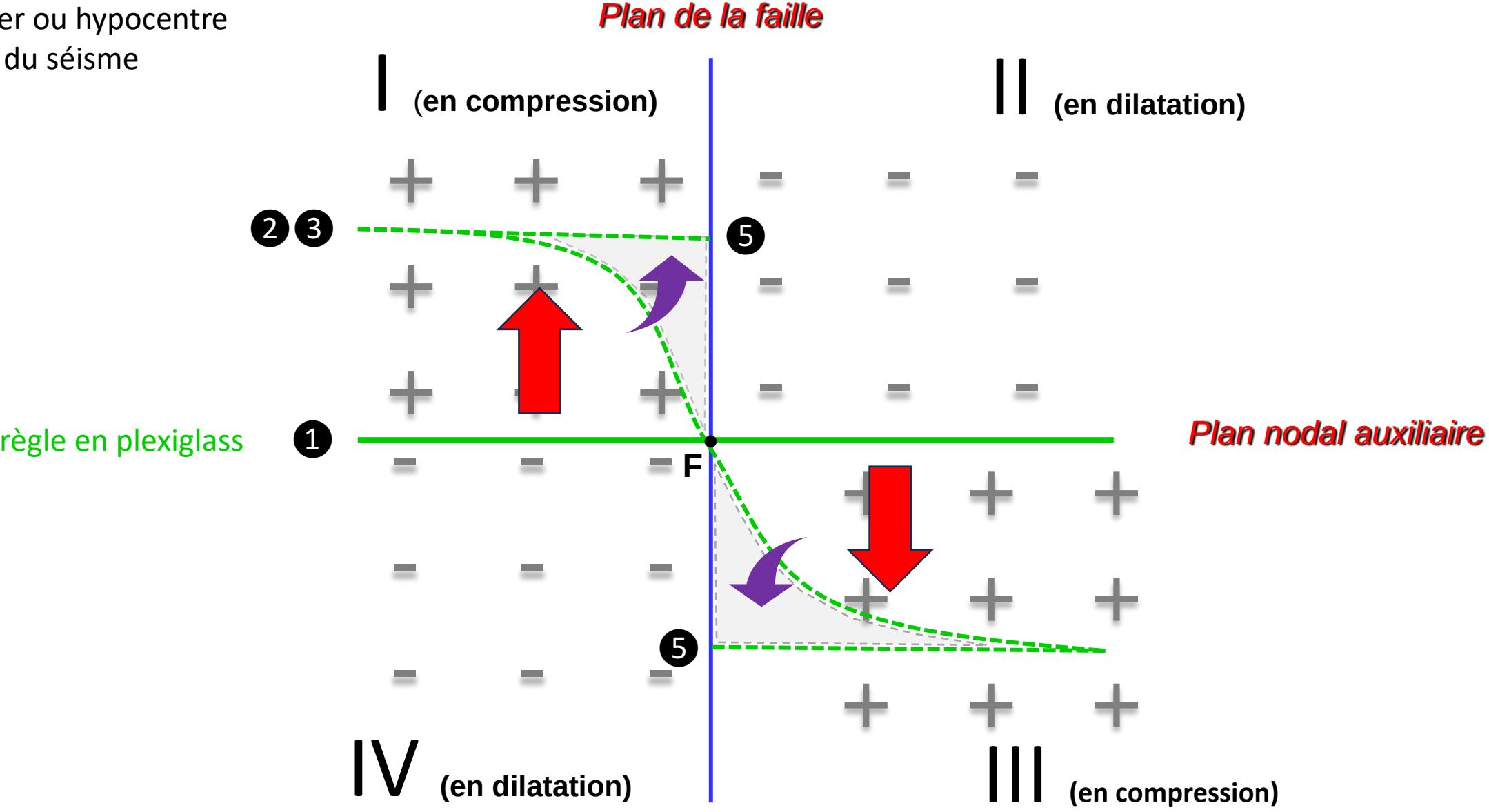
La première onde P qui va en partir sera une onde P en dilatation.

En un mot, au moment du séisme, de la matière se déplace brusquement de la zone IV vers la zone I à gauche de la faille décrochante. Il en résulte une dilatation en amont dans le quadrant IV et une compression en aval dans le quadrant I.

On peut faire le même raisonnement de l'autre côté de la faille décrochante pour les quadrants II et III.

De la matière se déplace de la zone II vers la zone III. Il y a dilatation en amont dans le quadrant II et compression en aval dans le quadrant III.

F = Foyer ou hypocentre
du séisme



Plan de la faille

I (en compression)

Les premières
ondes P parties
du foyer sont
en compression

II (en dilatation)

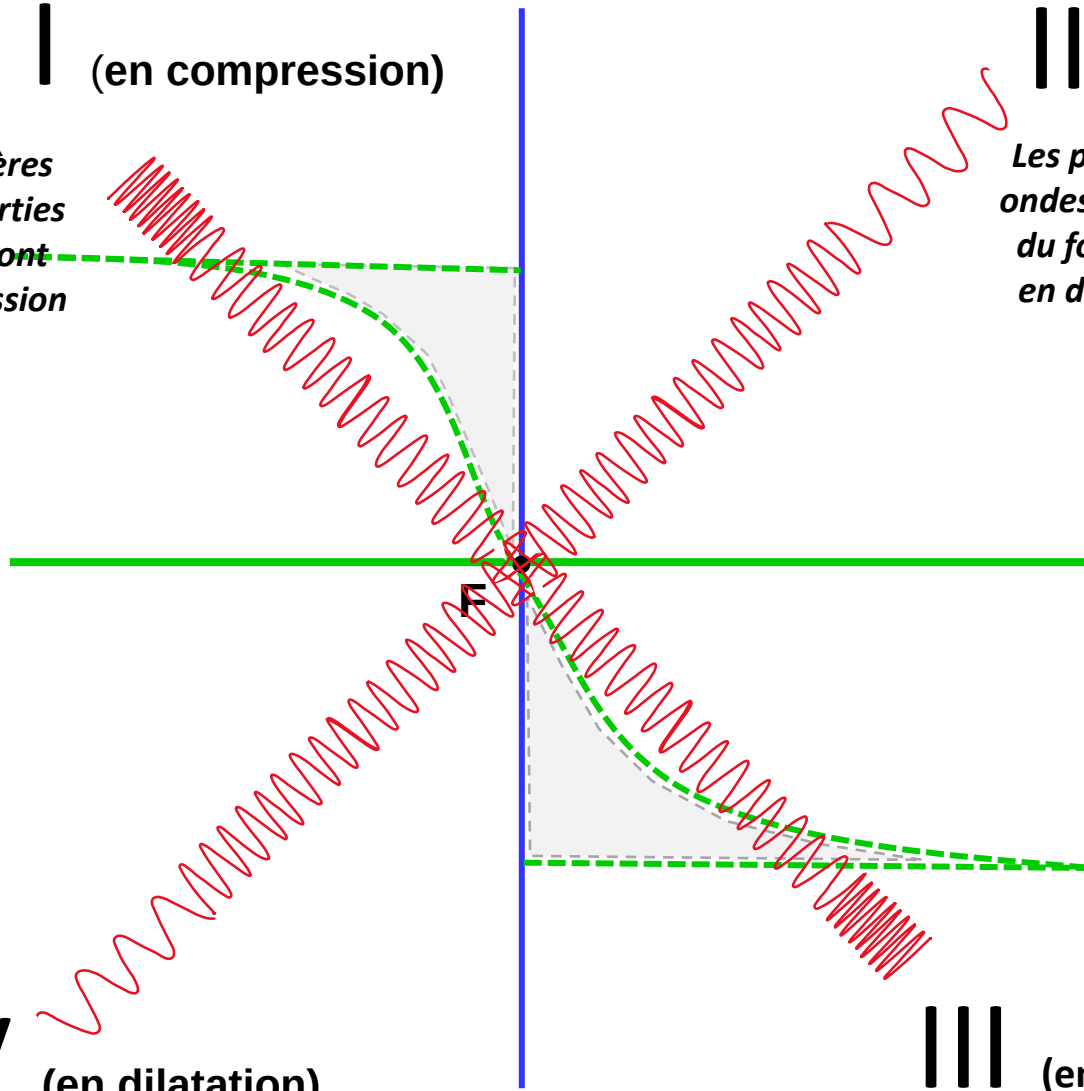
Les premières
ondes P parties
du foyer sont
en dilatation

règle en plexiglass

Plan nodal auxiliaire

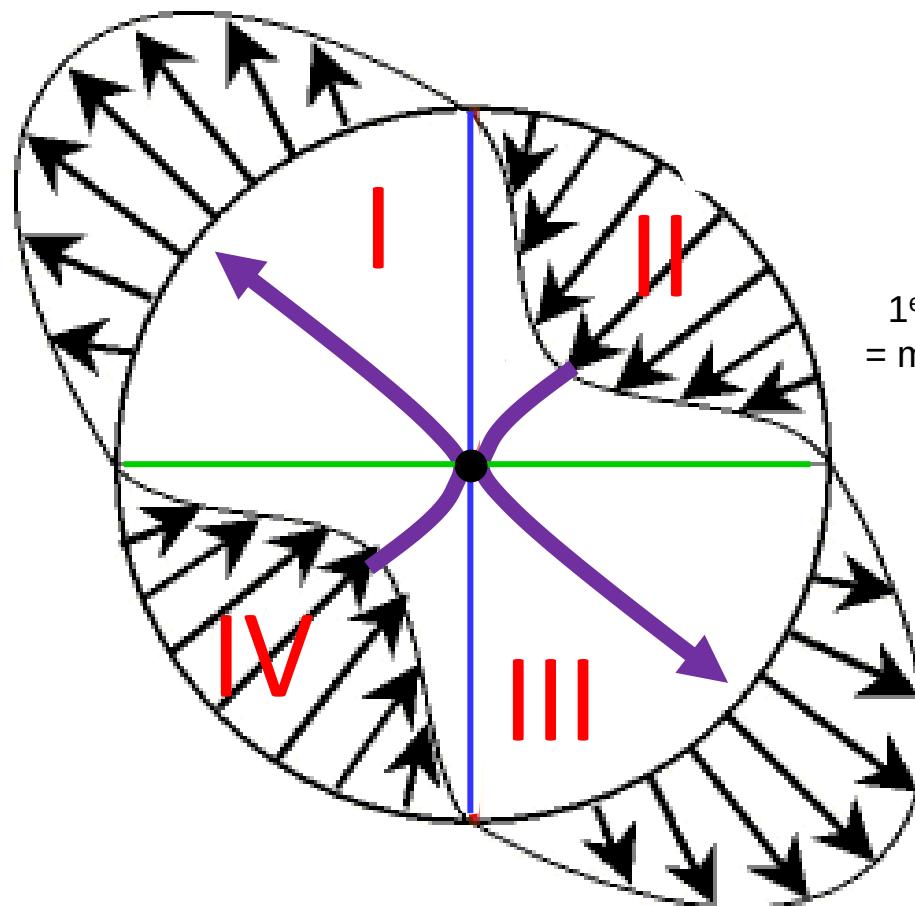
IV (en dilatation)

III (en compression)



1^{er} mouvement au foyer
= mouvement en compression

déplacement de la matière



1^{er} mouvement au foyer
= mouvement en dilatation

Dans le quadrant I, si le tout premier mouvement qui part du foyer est une brusque compression, une brusque poussée, il va alors se produire un peu ce qui se passe dans un ascenseur.

Imaginons que l'on soit dans un ascenseur immobile. Lorsque brusquement il monte, c'est-à-dire que l'on reçoit une poussée orientée du bas vers le haut, notre corps s'affaisse, nos jambes fléchissent. Notre centre de gravité s'abaisse c'est-à-dire se rapproche du plancher.

Par analogie, il va en être de même dans le quadrant I. Dans ce quadrant, toutes les stations d'enregistrement situées à sa surface vont par conséquent se rapprocher du foyer. Et le premier mouvement du stylet des sismographes horizontaux sera un mouvement vers le haut. Et il en sera de même dans le quadrant III.



En revanche, dans les quadrants II et IV, le tout premier mouvement au foyer est une brusque dilatation.

On peut encore reprendre l'exemple de l'ascenseur. Lorsque brusquement il descend, notre corps s'allonge, nos jambes viennent en extension. Notre centre de gravité monte donc s'éloigne du plancher.

Par analogie, dans le quadrant II et dans le quadrant IV, les stations d'enregistrements situées à leur surface vont alors s'éloigner du foyer. Et le premier mouvement qu'inscrira le stylet de tous les sismographes horizontaux sera un mouvement vers le bas.



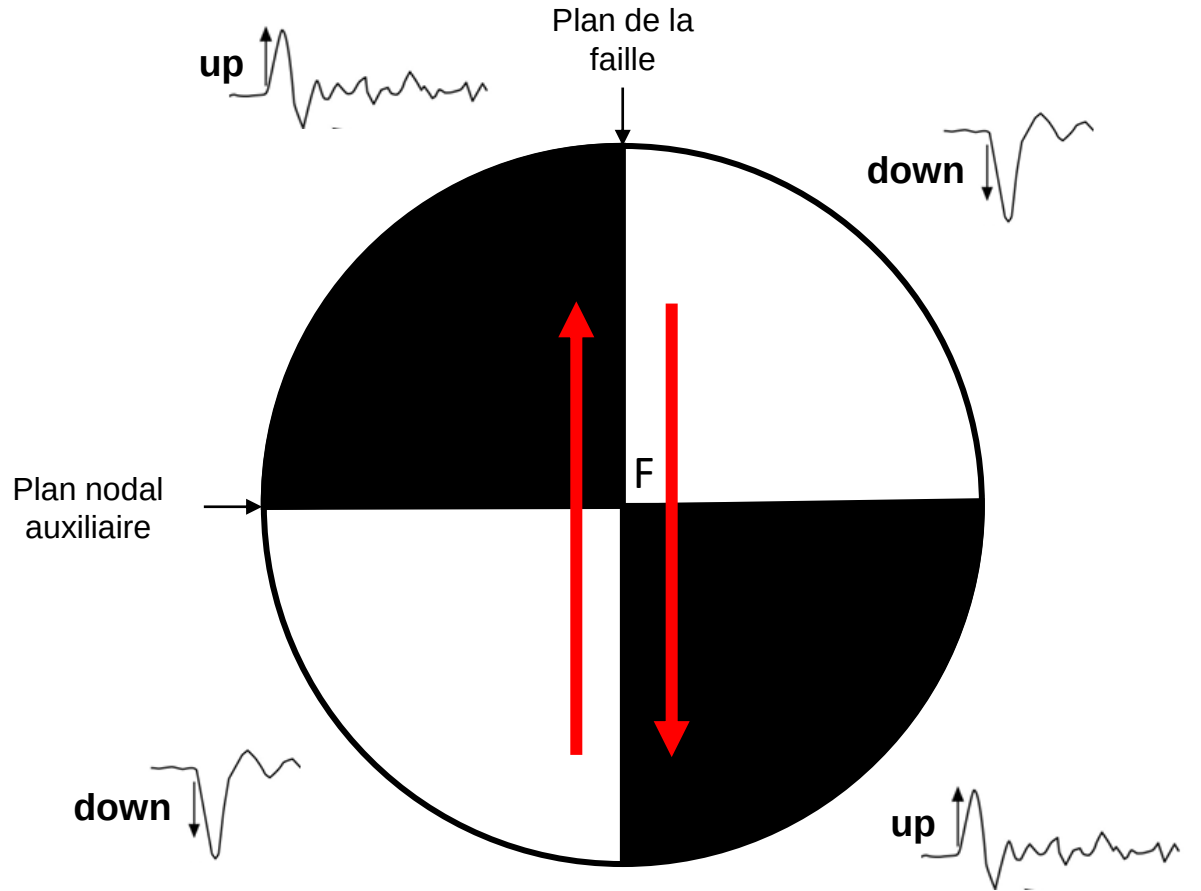
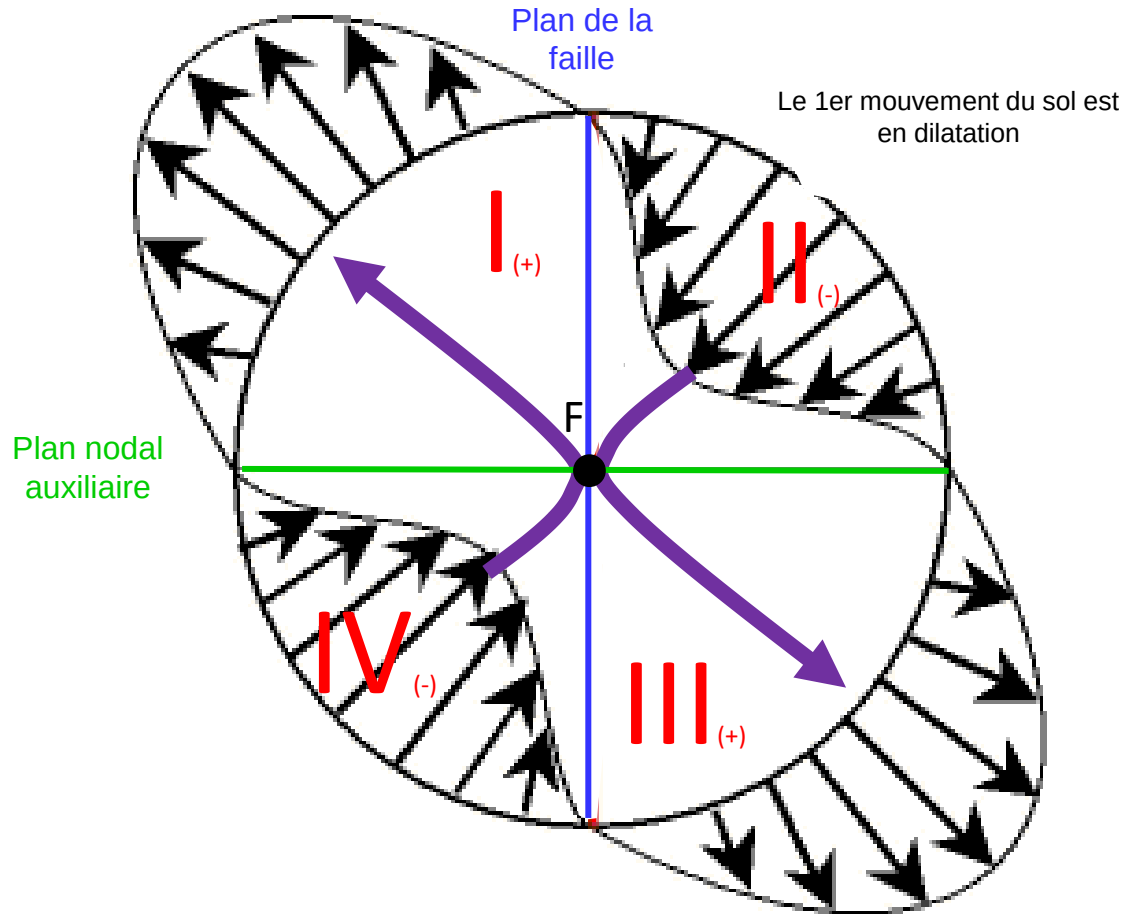
C'est ce que H.F. Reid a observé lors du séisme de San Andreas.

Par convention (voir diapositive suivante), les quadrants (+) sont représentés en noir et les quadrants (-) en blanc.

Au moment d'un séisme, on peut remarquer que la matière se déplace de chaque côté de la faille toujours du quadrant blanc vers le quadrant noir.

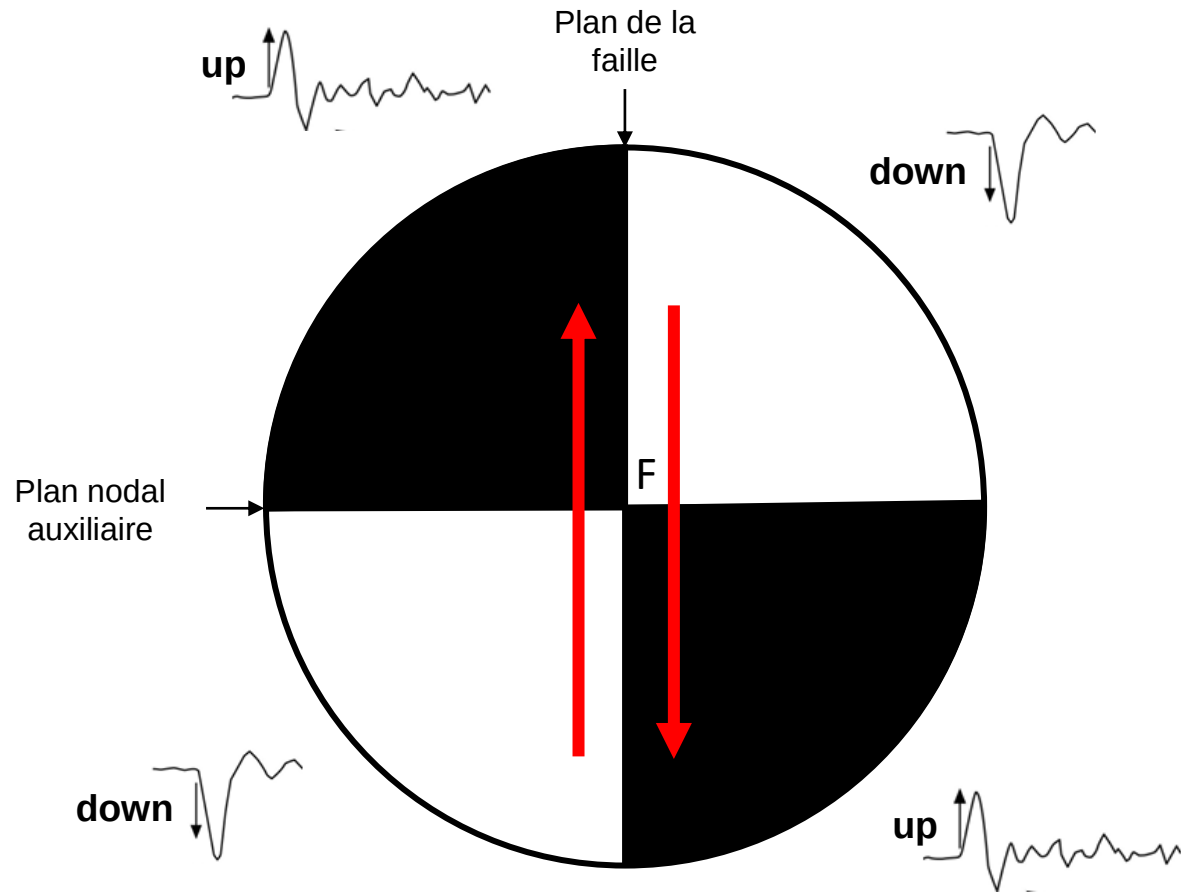
Représentation conventionnelle : la sphère focale

Le 1^{er} mouvement du sol est en compression



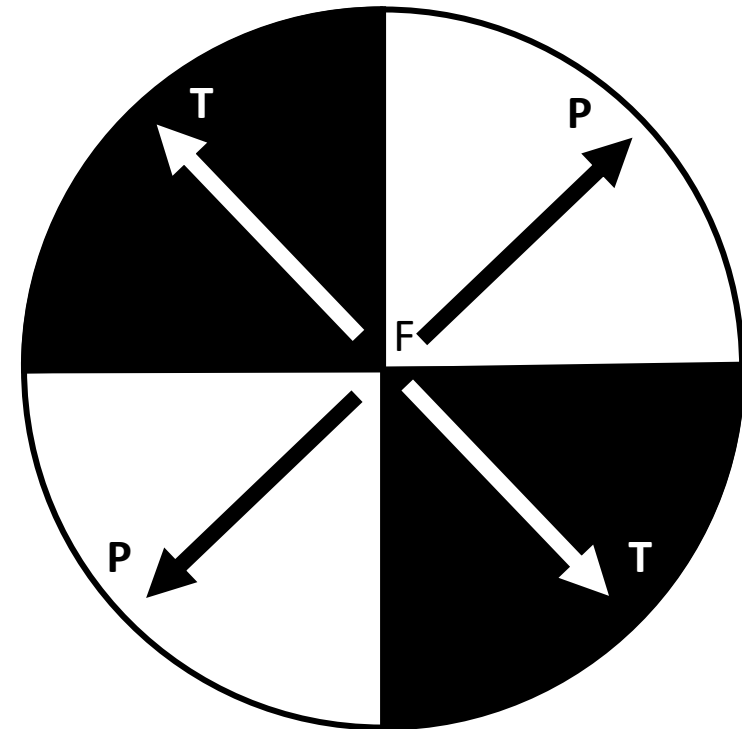
La sphère focale dans le cas de la faille de San Andreas (faille décrochante dextre)

Représentation conventionnelle : la sphère focale



Les tectoniciens utilisent un autre vocabulaire.

Ils disent que les quadrants I et III noirs sont sous tension (T) et que les quadrants II et IV blancs sont sous pression (P).



La sphère focale dans le cas de la faille de San Andreas
(faille décrochante dextre)

<https://www.youtube.com/watch?v=MomVOkyDdLo>



2 Mecanismes au foyer.exe

Tout ce que l'on vient de dire s'applique aussi pour les failles inverses et normales.

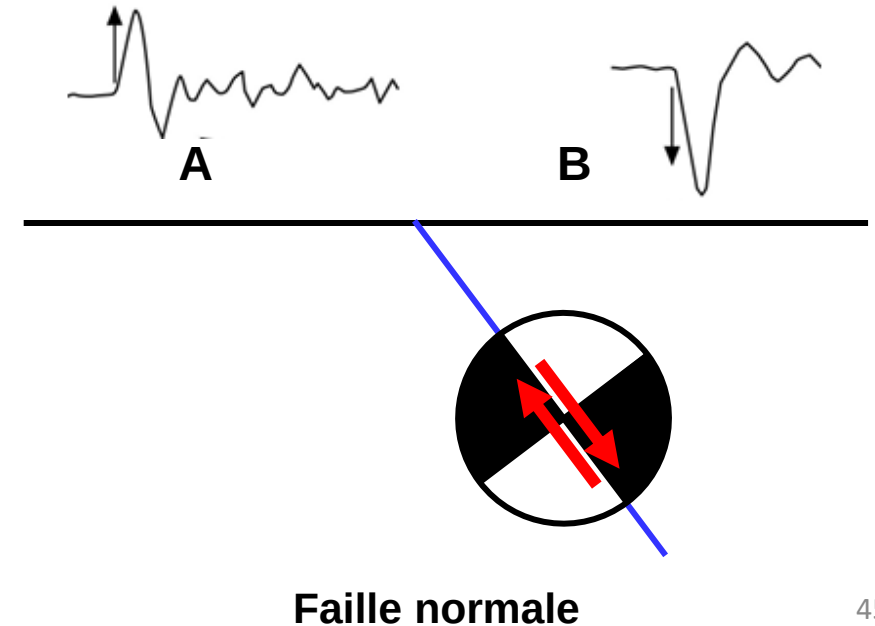
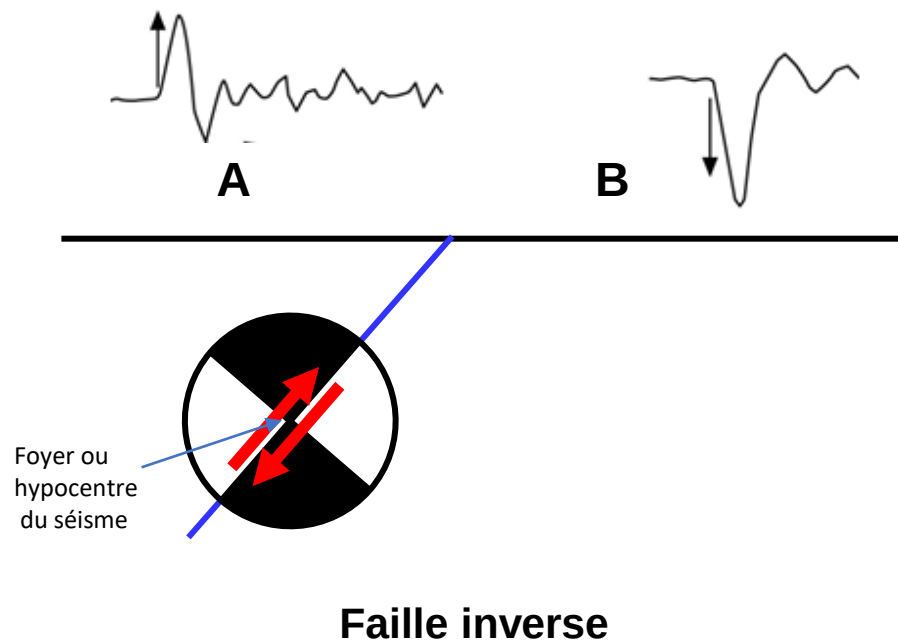
Examinons le cas d'une faille inverse (en bas à gauche). On peut représenter la sphère focale du séisme en faisant coïncider l'un des deux plans nodaux de la sphère focale avec celui de la faille inverse puis en se rappelant que de chaque côté de la faille, la matière se déplace toujours du quadrant blanc (-) vers le quadrant noir (+).

Ceci étant fait, on en déduit que le premier mouvement du stylet enregistré par les sismographes verticaux situés à la surface du sol du compartiment A sera dirigé vers le haut.

À l'inverse, le premier mouvement du stylet enregistré par les sismographes du compartiment B sera dirigé vers le bas.

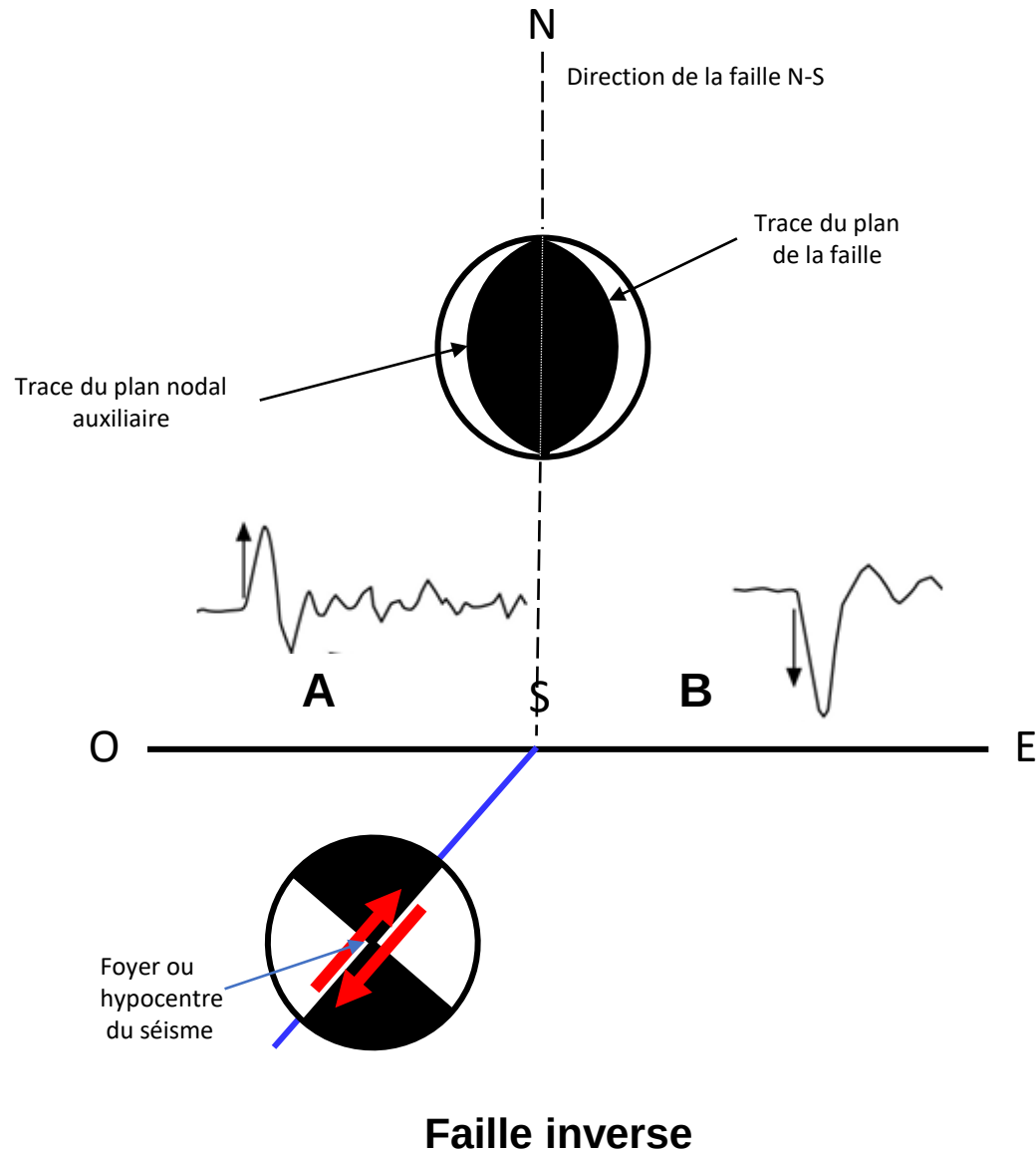
Sur le schéma de droite où est représentée une faille normale, on opère exactement de la même façon.

Les sismogrammes verticaux situés à la surface du compartiment A enregistreront un premier mouvement du stylet vers le haut, le contraire pour le compartiment B.

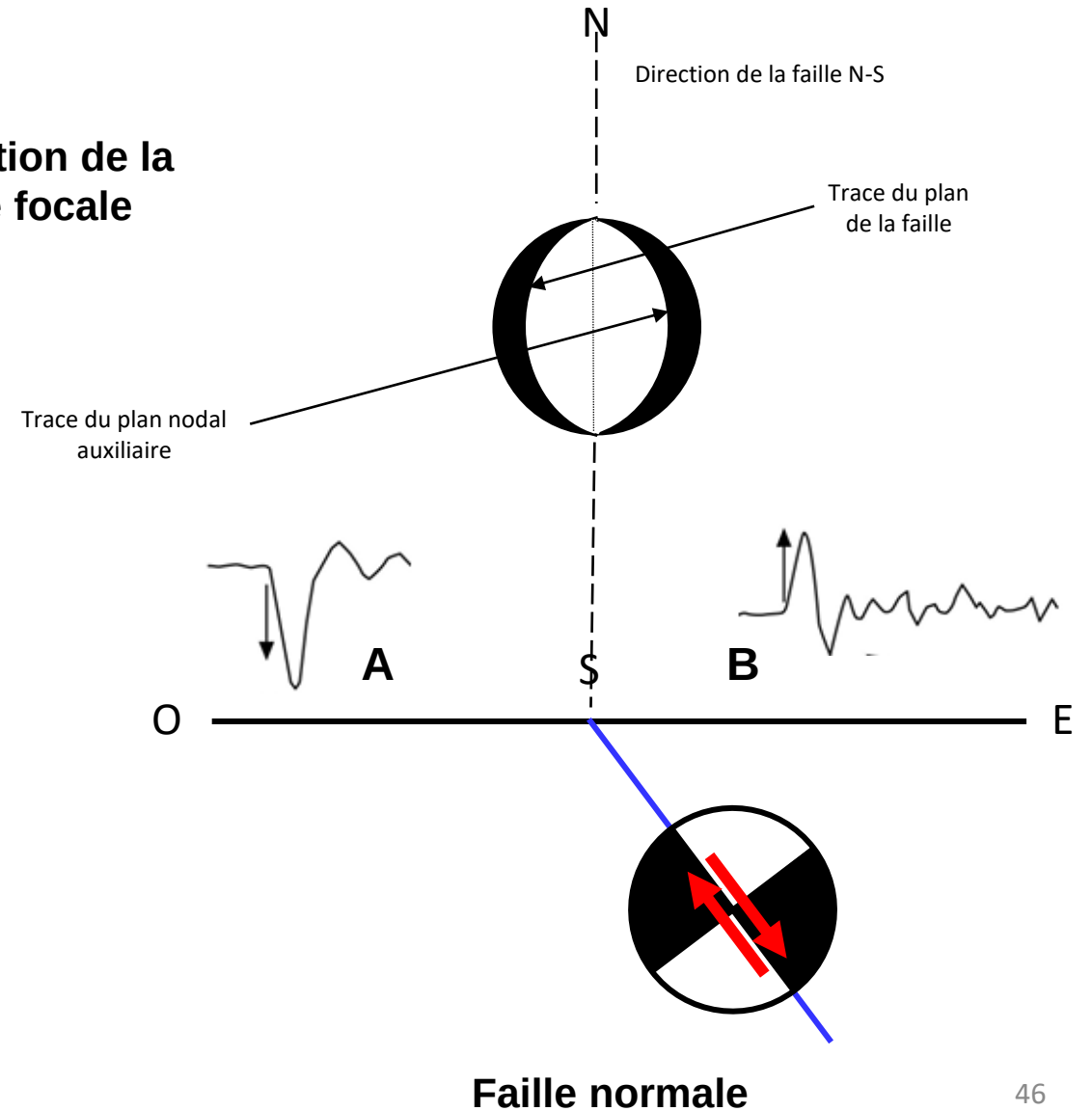


On peut ensuite projeter ces deux sphères focales sur la surface horizontale du sol pour les comparer à celle obtenue pour la faille décrochante dextre de San Andreas (voir diapositive 39).

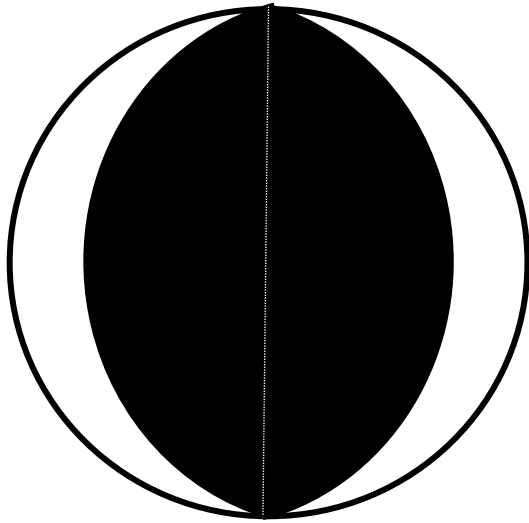
On supposera que les deux failles, inverse et senestre, sont orientées N-S et qu'elles ne sont pas décrochantes.



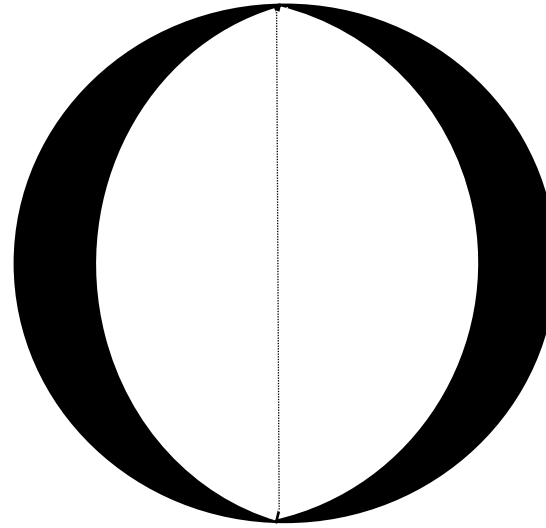
Projection de la sphère focale



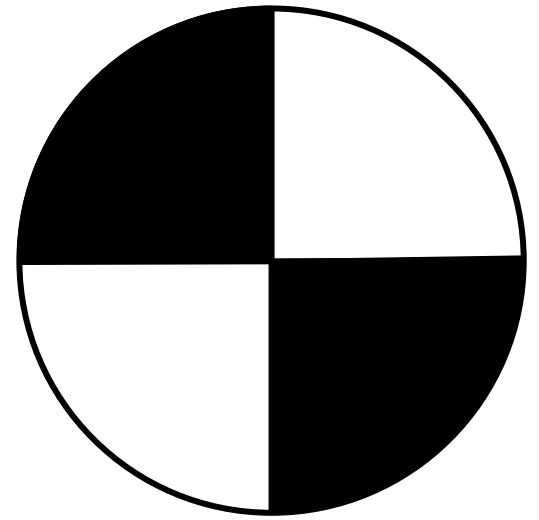
On obtient les résultats suivants :



Faille inverse



Faille normale



**Faille verticale
décrochante**

Lorsque le quartier noir se trouve au centre de la projection de la sphère focale, cela traduit une situation de compression horizontale au foyer et donc de faille inverse.

Lorsque c'est le quartier blanc qui est au centre, cela traduit au contraire une situation de dilatation horizontale au foyer et donc de faille normale.

Lorsque il y a quatre quadrants symétriques, on est en présence d'une faille verticale décrochante.

Une fois construite la projection de la sphère focale pour un séisme donné, il sera donc facile d'en déterminer le mécanisme au foyer.

Dans la pratique, il suffit par conséquent :

- de récolter de nombreux sismogrammes du séisme,
- pour chaque station, de bien examiner le premier mouvement du stylet ce qui implique des instruments de grande qualité,
- puis de reporter sur une carte (pour des séismes proches) voire sur un planisphère (pour des séismes de grande magnitude et lointains) tous ces premiers mouvements.

Dans les cas les plus simples, on obtiendra une figure voisine d'une des trois représentations de la diapositive précédente et le problème sera résolu !

Remarque : Dans la réalité, les mouvements au niveau du foyer peuvent être plus complexes et une faille inverse peut se conjuguer avec un mouvement de décrochement, dextre ou senestre !

Les projections des sphères focales peuvent être alors moins évidentes à interpréter !

Décrochement à
composante inverse



Décrochement à
composante normale



Voir l'excellente vidéo :

<https://www.youtube.com/watch?v=e7Dja7epxso>

Exercice (d'après « Structure et évolution du globe terrestre » de Paul Nougier - Collection Ellipses)

(NB : On raisonne ici à l'échelle du globe.)

Le plan de la faille passe obligatoirement par l'épicentre E.

On peut tout de suite remarquer que de part et d'autre de E, en S1 et en S2, les premiers mouvements enregistrés par les deux sismogrammes sont opposés ce qui est tout à fait normal !

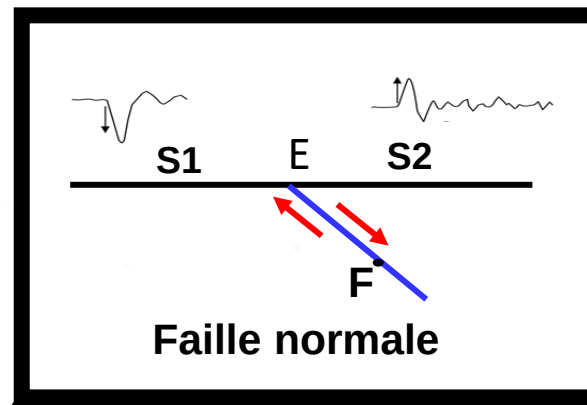
En S1, il a lieu vers le bas ce qui implique que ce compartiment monte et en S2, vers le haut ce qui implique que lui descend (flèches rouges).

Le plan de la faille doit aussi à l'opposé de E passer entre deux stations ayant enregistré des premiers mouvements opposés.

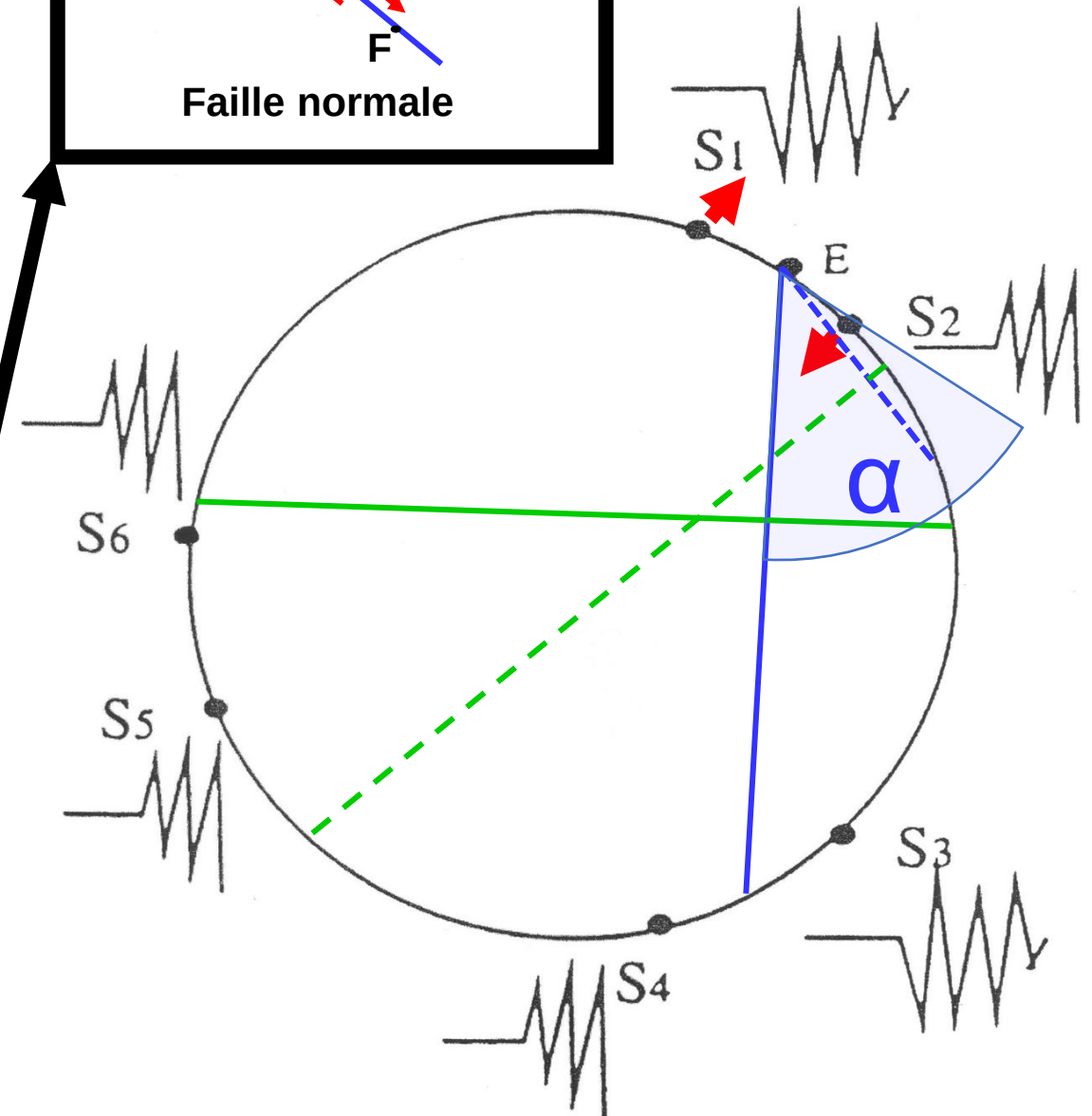
On pourrait le faire passer entre S2 et S3 (trait bleu en pointillé) mais dans ce cas le plan nodal auxiliaire, qui lui est perpendiculaire, passerait entre S4 et S5 ou entre S5 et S6 (trait vert en pointillé) qui ont toutes enregistré un même premier mouvement vers le haut alors que l'on sait qu'il doit séparer deux quadrants de signe opposé.

La seule solution qui reste est de faire passer le plan axial entre S3 et S4.

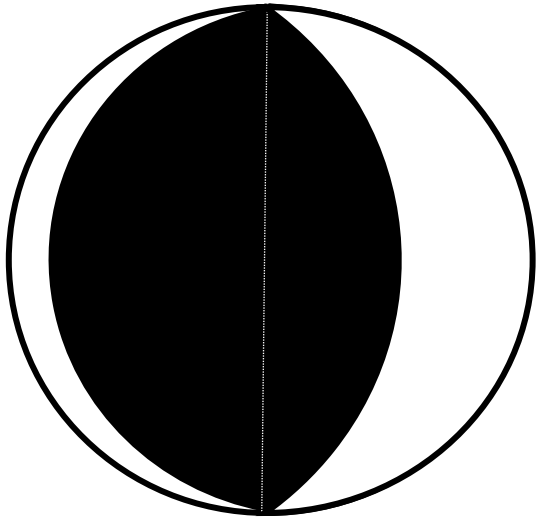
Vu l'angle que fait le plan de faille avec la surface du sol, on en déduit que le séisme qui a eu lieu en E est dû à **une faille normale** (solution dans le cadre).



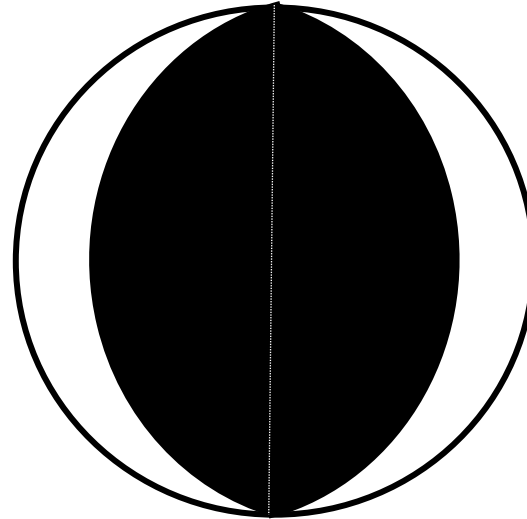
Solution



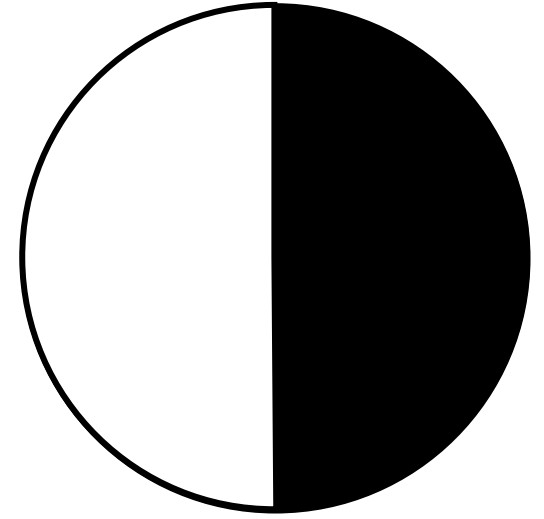
On constate sur la coupe du globe de la diapositive précédente que si les sphères focales sont bien déterminées, on pourra également déterminer avec précision le pendage de la faille (angle α).



Faille inverse très pentue



Faille inverse moins pentue



**Faille inverse très peu
pentue**
(proche de l'horizontale)

Cet exercice pour montrer que aujourd'hui toutes les mesures
peuvent être faites par méthode satellitale

Exploitation des sismogrammes du séisme de La Laigne – Détermination du mécanisme au foyer

L'exploitation des sismogrammes de 98 stations a permis d'obtenir le document de la diapositive suivante où l'on voit bien que l'on peut diviser le secteur autour de l'épicentre du séisme en 4 quadrants délimités par deux droites qui représentent les deux plans nodaux.

Remarque : Certaines stations posent quand même problème !

Comme l'on travaille ici sur une projection en surface de la sphère focale, on peut donc conclure tout de suite que la faille qui a joué à La Laigne le 16 juin 2023 est une faille décrochante.

Mais on a tracé deux droites !

Laquelle de ces deux droites représente la trace de la faille ?

Les deux peuvent potentiellement représenter la faille.

En effet, on a vu (diapositive 43) que de chaque côté du plan de la faille, la matière se déplace toujours d'un quadrant (–) vers un quadrant (+).

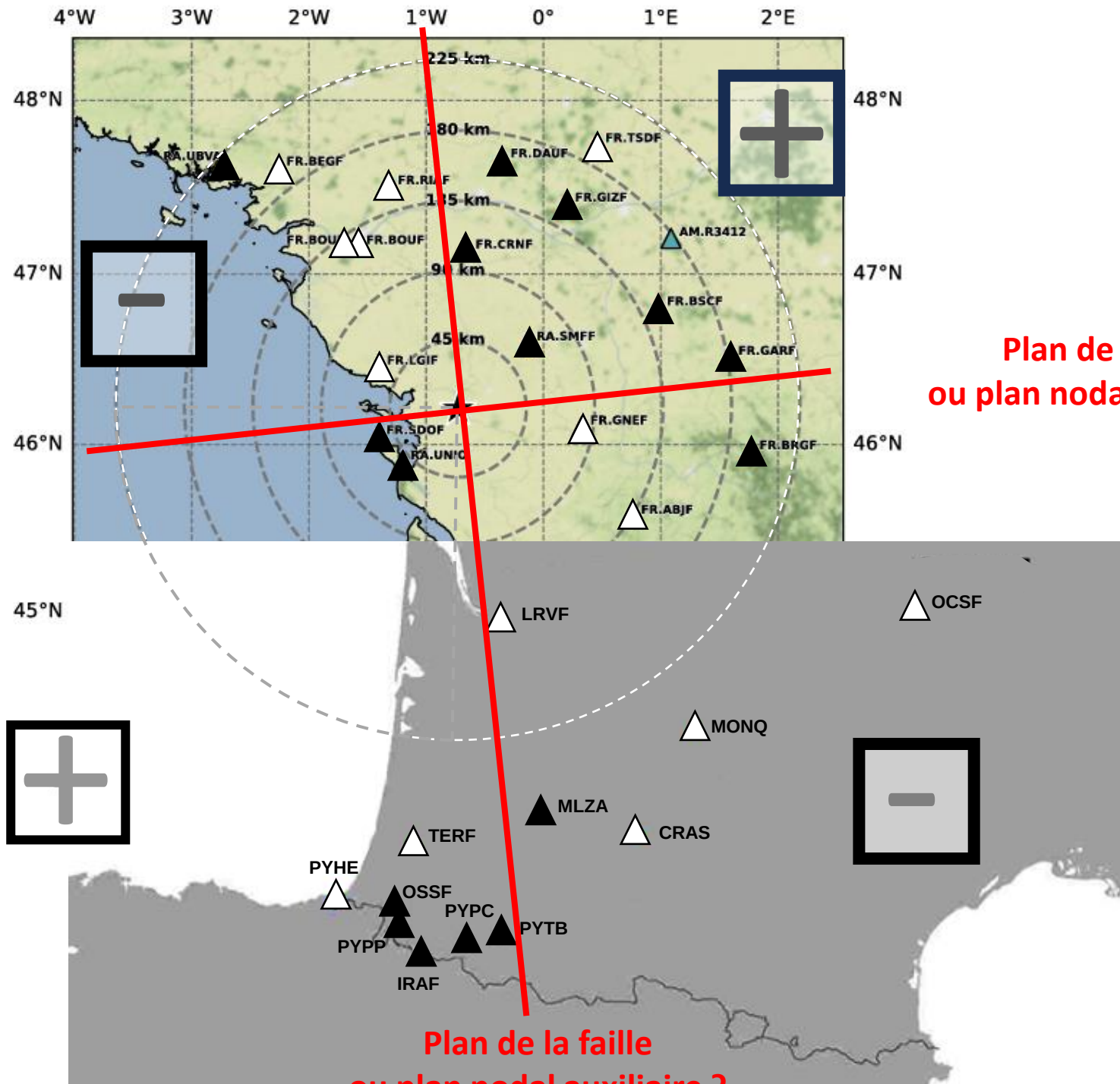
Si la trace de la faille est la droite rouge de direction approximativement Ouest - Est, la matière au Nord se déplacerait d'Ouest en Est et inversement au Sud. **Cette faille de direction Ouest - Est serait alors décrochante dextre.**

Si la trace de la faille est la droite rouge de direction approximativement Nord - Sud, la matière à l'Ouest se déplacerait du Nord vers le Sud et inversement à l'Est. **Et alors dans ce cas-là, la faille de direction Nord - Sud serait décrochante senestre.**

1^{er} mouvement enregistré
par le sismographe vertical

△ Z down

▲ Z up



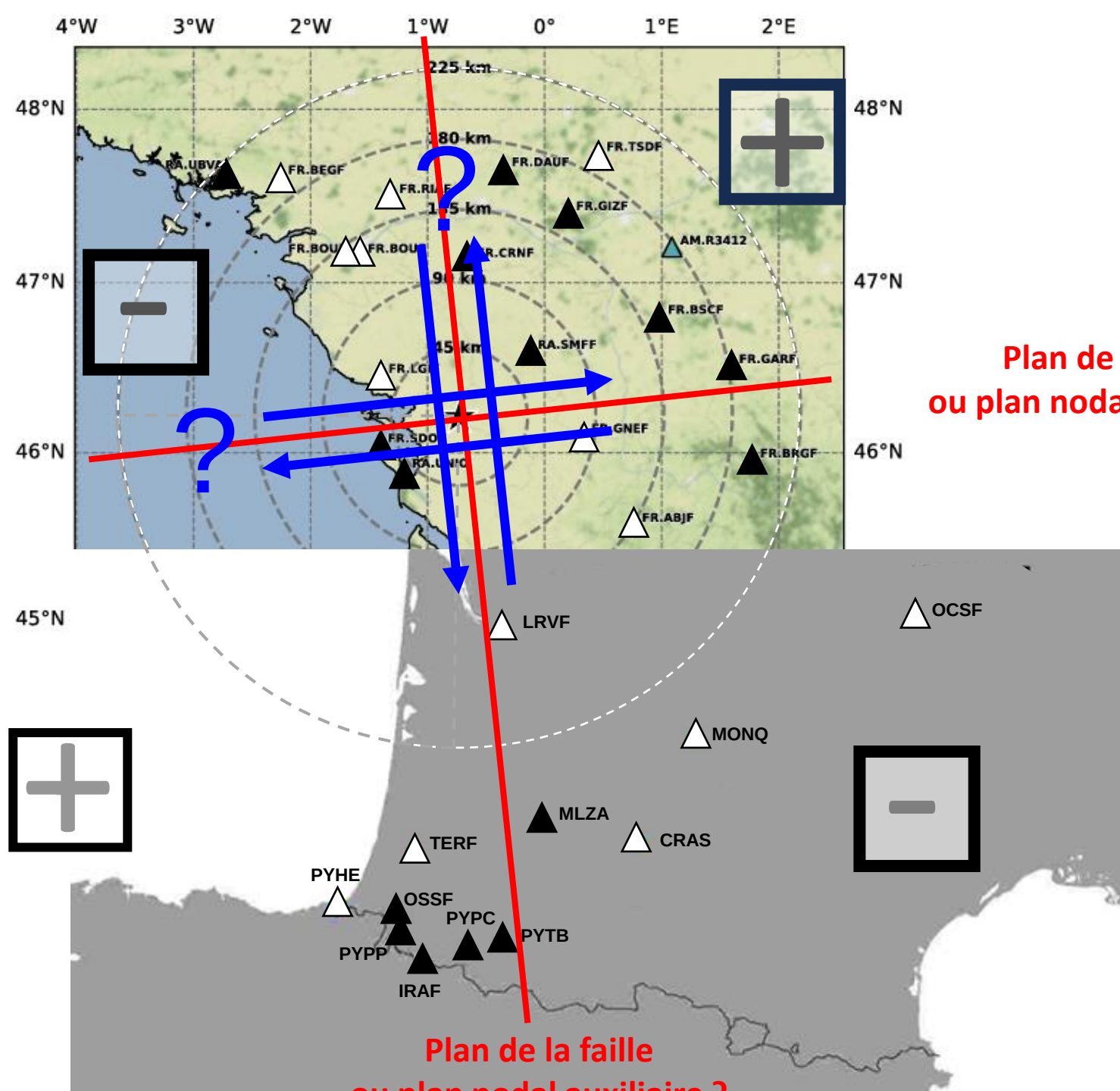
Plan de la faille
ou plan nodal auxiliaire ?

Plan de la faille
ou plan nodal auxiliaire ?

1^{er} mouvement enregistré
par le sismographe vertical

△ Z down

▲ Z up



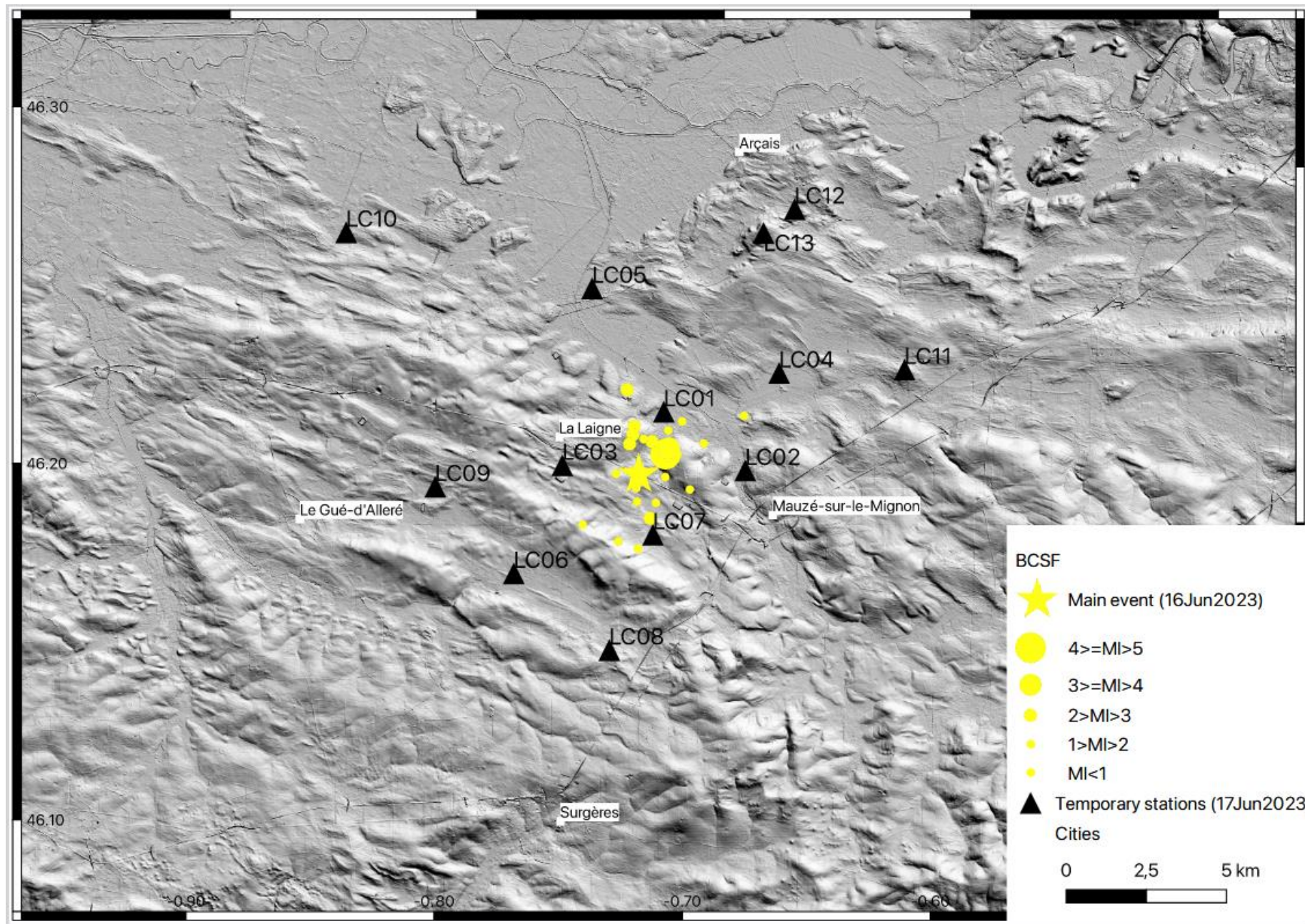
Pour lever l'ambiguïté, il faut faire appel à la survenue de répliques.

Les foyers des répliques se localisent au niveau du plan de la faille. Et comme elles ont lieu en des endroits différents, l'alignement de leurs épicentres permettra d'en déduire la direction de la faille.

C'est pourquoi immédiatement après le séisme, ont été installés au voisinage de l'épicentre des stations mobiles temporaires qui ont pu enregistrer les répliques.

Le document suivant montre que ces répliques sont denses et orientées Nord-Sud près de l'épicentre.

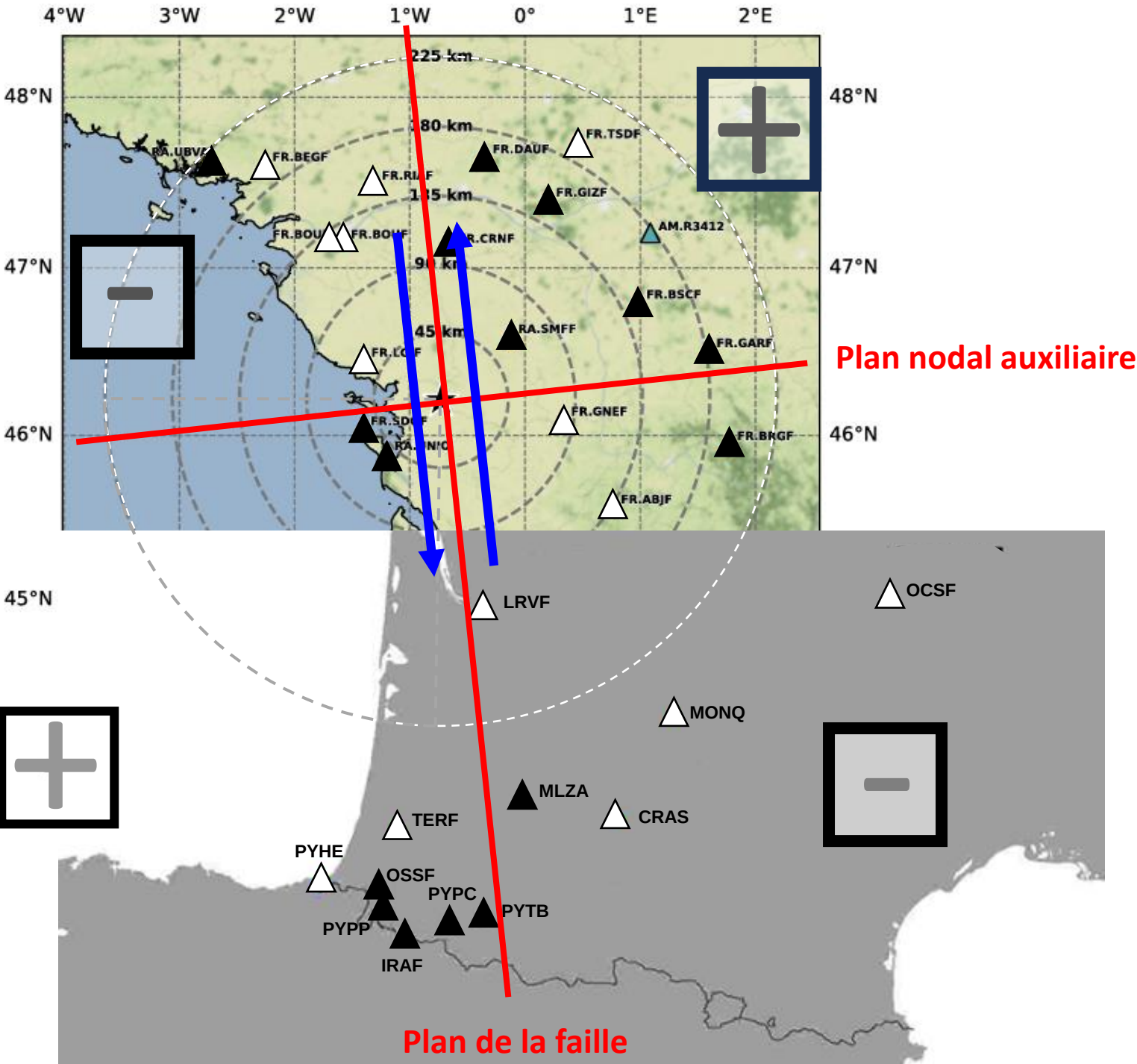
On peut donc en conclure que la faille qui a joué à La Laigne est une faille décrochante de direction presque Nord-Sud et donc senestre.



Carte des stations installées après le séisme du 16 juin 2023 (▲)
dans l'Ouest de la France par l'équipe nantaise depuis le 17/06/23 avec les répliques

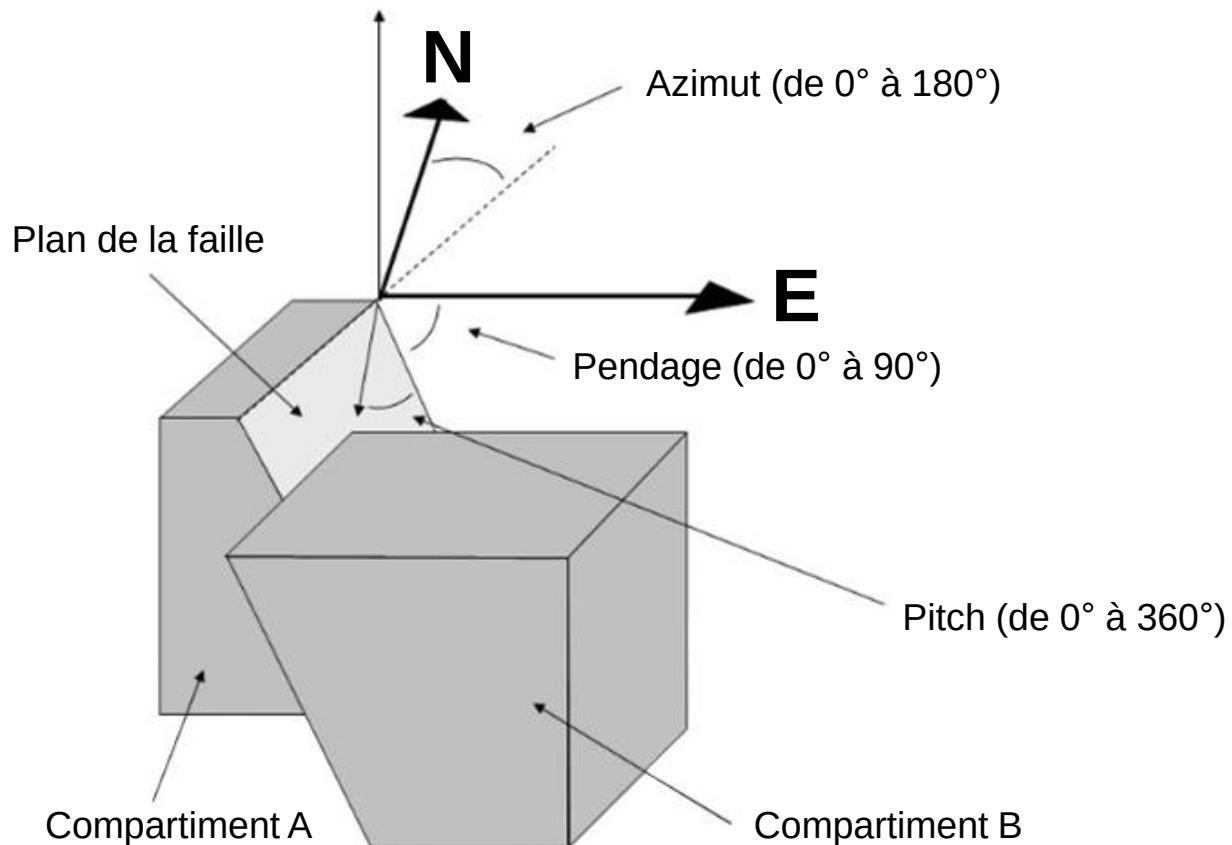
Solution :

Faille décrochante
senestre



L'analyse fine des sismogrammes par des spécialistes en sismologie (et il y a beaucoup d'informatique pour modéliser tous les résultats !) a permis de conclure que la faille responsable du séisme du 16 juin 2023 est une faille :

- décrochante senestre (ce qui peut surprendre car les failles de la branche Sud du CSA jouent le plus souvent en dextre) de direction (strike) N 4°,
- de pendage voisin de 80 - 85° donc proche de la verticale (dip),
- avec une légère composante inverse (rake)



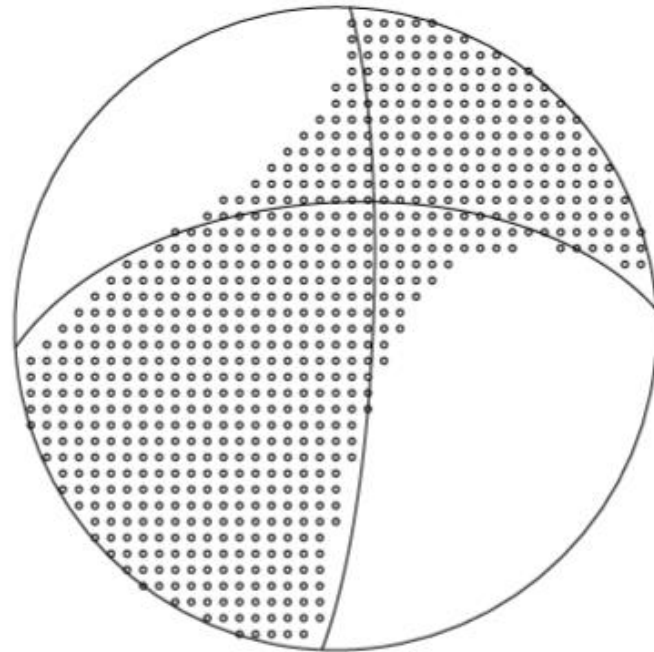
Strike = azimut de la faille - C'est l'angle que fait le plan de faille avec le Nord.

Dip = pendage du plan de la faille - Le pendage de la faille est l'angle que le plan de faille fait avec l'horizontale

Rake = pitch (ou angle de chute), direction du glissement de la faille - Le pitch est l'angle que font les marques (tectoglyphes) portées par le plan de la faille avec l'horizontale dans le plan de faille.

Mécanisme à partir de la polarité de l'onde P

eost2023lsol, France



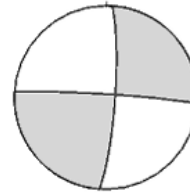
WCMT, Mw= 4.81

azimut de la faille (strike) = 4°
 pendage du plan de la faille (dip) = 82°
 Pitch ou angle de chute (rake) = 3°

Profondeur 7 km

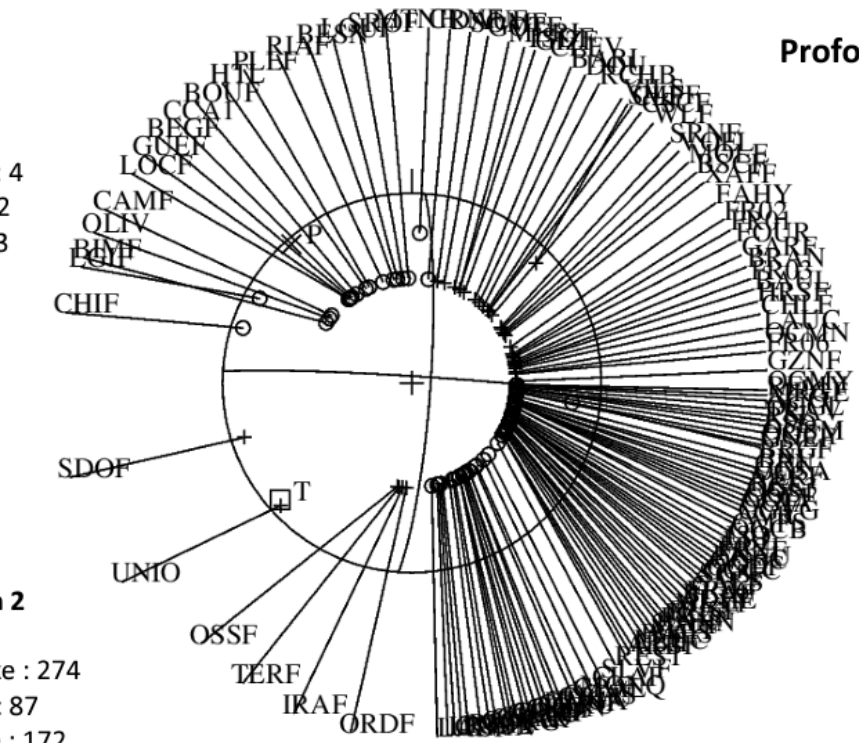
Plan 1

strike : 4
 dip : 82
 rake : 3



Plan 2

strike : 274
 dip : 87
 rake : 172



+ : first motion in compression (Zup) o : first motion in dilatation (Z down)