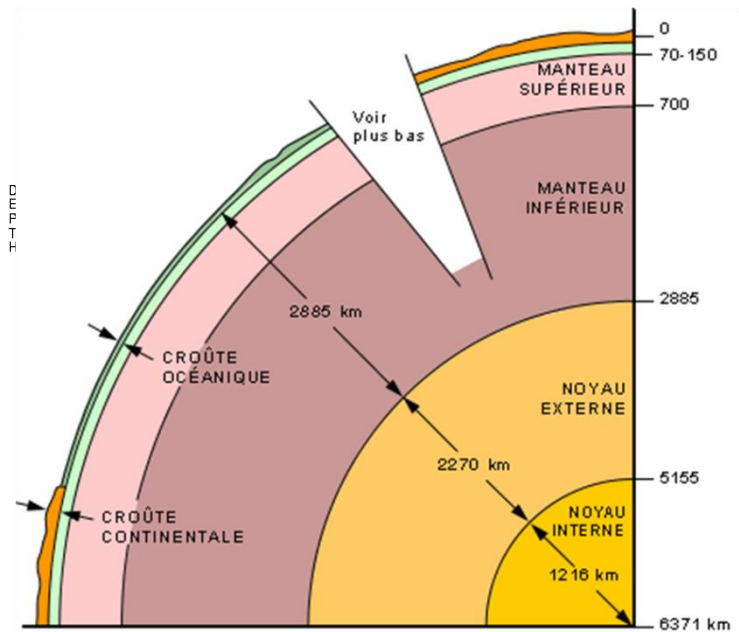
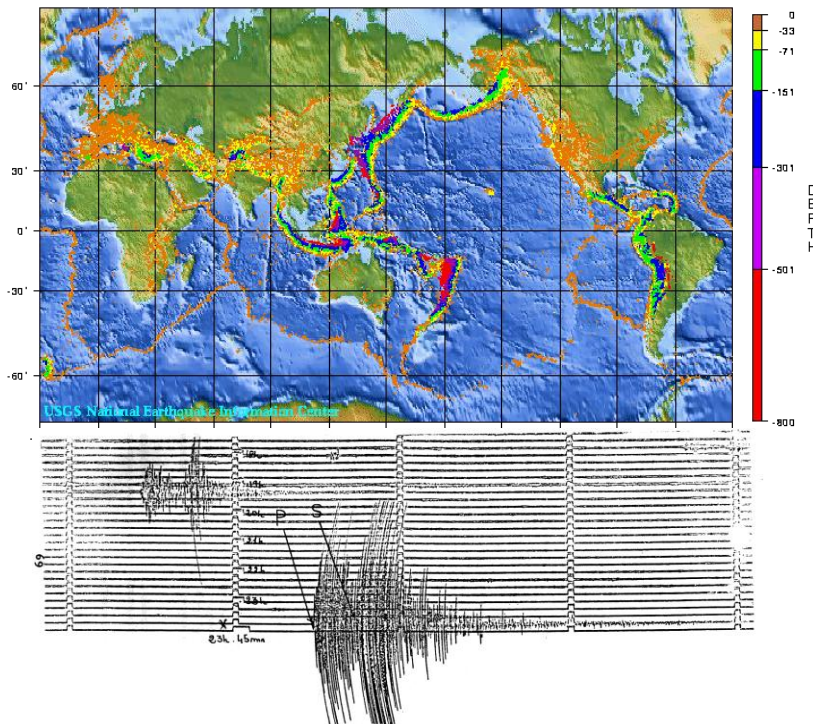


Notions de sismologie et structure interne de La Terre



Notions de sismologie et structure interne de La Terre

Deuxieme Séance : 2

4- Etude macrosismique

L'étude macrosismique est l'examen des séismes sans l'aide d'appareils. Elle permet d'obtenir des données intéressantes à partir de l'observation des effets des séismes. Elle permet également la détermination de l'intensité des séismes et l'établissement des cartes d'isoséistes appelées également Cartes macrosismiques.

a – Intensité d'un séisme :

L'intensité d'un séisme est une valeur traduisant le **degré de violence** d'un séisme. Ce dernier est déterminé d'après l'importance des effets **ressentis** et **observés** et les **dégâts** causés : réveil, chute d'objets, fissures, dégâts plus ou moins importants. le degré d'intensité est évalué grâce à des **échelles d'intensité** connues à l'échelle internationale.

4- Etude macrosismique

b – Échelles d'intensité :

Degré	Description des effets typiques observés
I	Secousse non perceptible, détectée et enregistrée par instrumentation
II	Secousse à peine perceptible, plutôt dans les étages supérieurs
III	Secousse faible ressentie de façon partielle, comparable à celle due au passage d'un camion léger Léger balancement des objets suspendus
IV	Secousse largement ressentie, comparable à celle due au passage d'un camion lourdement chargé N'effraie pas les gens bien que quelques dormeurs soient réveillés
V	Réveil des dormeurs, agitation des animaux, large balancement des objets suspendus, tremblement des constructions, portes et fenêtres ouvertes battent avec violence
VI	Frayeur générale, premières fissures, apparition de crevasses de l'ordre du cm dans les sols détrempés, glissements de terrain en montagne
VII	Dommages aux constructions, difficulté des gens à rester debout, fissures en travers des routes et dans les murs de pierre
VIII	Destruction des bâtiments, effondrement de murs de pierre, panique, glissements de terrain, l'eau des lacs se trouble, changement dans le débit et le niveau de l'eau
IX	Dommages généralisés aux constructions, panique générale, affolement des animaux, dégâts considérables au mobilier, monuments et colonnes tombent, rupture partielle des éléments au sol : canalisations souterraines, routes, crevasses atteignant 10 cm, chutes de rochers, vagues dans l'eau
X	Destruction générale des bâtiments, torsion des rails de chemin de fer, dommages sévères aux ponts, crevasses au sol pouvant atteindre 1 m, glissements de terrain considérables
XI	Catastrophes, grandes routes inutilisables, larges crevasses, glissements de terrain et chutes de rochers extrêmement importants
XII	Cataclysme, changement du paysage, toutes les structures au-dessus et en dessous du sol sont gravement endommagées ou détruites, vallées barrées et transformées en lacs, rivières déviées

Plusieurs échelles d'intensité ont été définies. Les plus utilisées sont l'échelle de **Mercalli** et l'échelle **MSK**. Ces deux échelles comportent **douze degrés** notés en chiffres romains de **I à XII**. Une autre échelle a été adoptée par les pays européens : **EMS 98**. Ces échelles sont établies en se basant sur le classement par ordre d'importance des effets macrosismiques

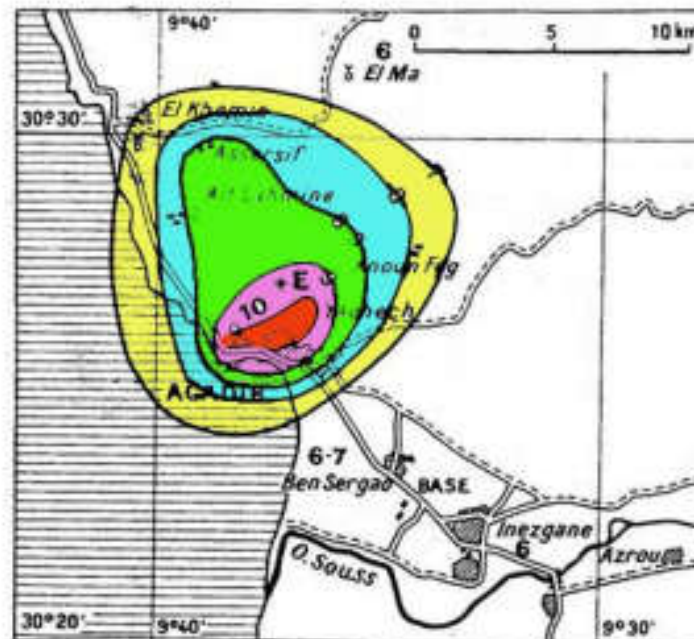
L'échelle MSK :

MSK sont les initiales des noms des trois sismologues, Medvedev, Sponheuer et Karnik, qui ont proposé cette échelle en 1964

4- Etude macrosismique

c – Les cartes d'isoséistes:

Une carte d'isoséistes est une carte sur laquelle on représente les courbes d'égale intensité qu'on appelle les isoséistes. Ces cartes délimitent les zones où le séisme a produit les effets du même degré d'intensité. Le centre de la zone de plus forte intensité est appelé *l'épicentre macrosismique*



cartes d'*isoséistes* du tremblement de terre d'Agadir en 1960

4- Etude macrosismique

c – Les cartes d'isoséistes: Tremblement de terre d'Agadir en 1960



La kasba avant le séisme



La kasba après le séisme



Bâtiment avant le séisme



Bâtiment détruit après le séisme

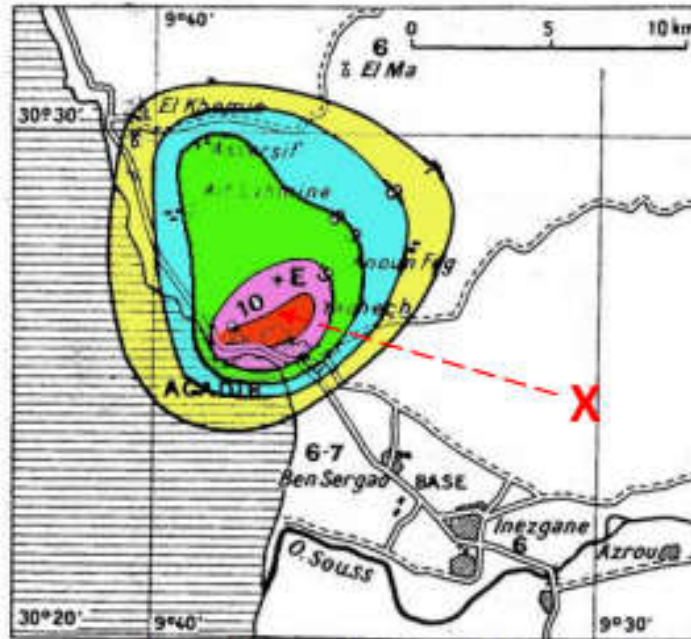
C'est le plus violent séisme que le Maroc a connu durant ce siècle.

- Plus de **12 000 morts**, et des destructions presque totales dans certaines quartiers de la ville,

- L'intensité maximale a été estimée de **10** (X) sur l'échelle **MSK**.

4- Etude macrosismique

c – Les cartes d'isoséistes: Tremblement de terre d'Agadir en 1960



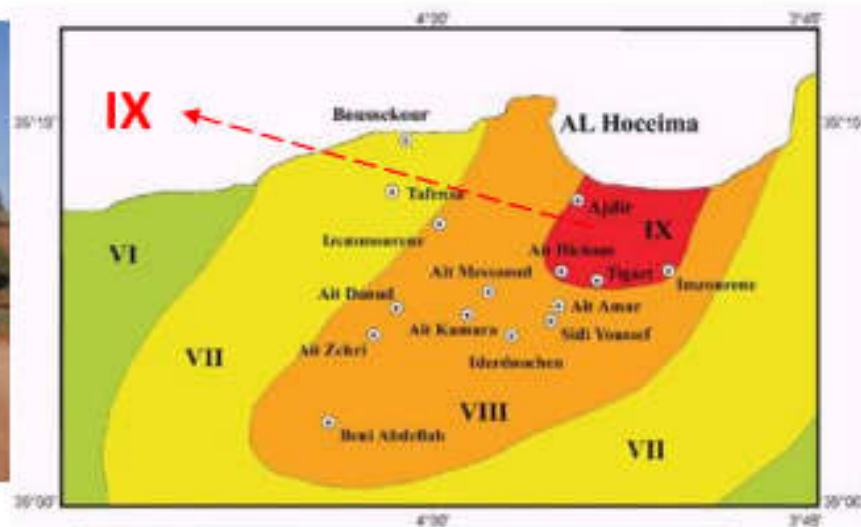
cartes d'isoséistes du tremblement de terre d'Agadir en 1960



4- Etude macrosismique

c – Les cartes d'isoséistes : Tremblement de terre d'Al Hoceima en 2004

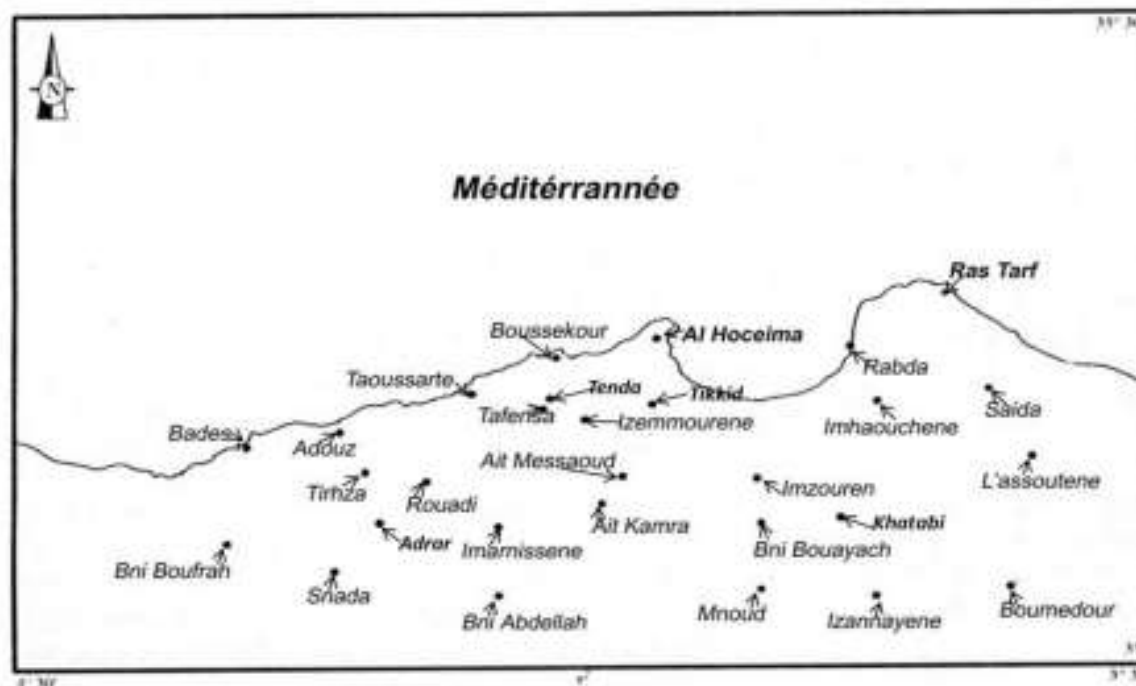
C'est le tremblement de terre le plus violent après celui d'Agadir, il a provoqué **800 morts**, plusieurs blessés, plus de 30.000 personnes sans abri et des dégâts matériels importants. L'intensité maximale a été estimée à **9 (IX)** sur l'échelle MSK



4- Etude macrosismique

Exercice d'application: Séisme d'Al Hoceima 1994 (à revoir en TD)

La ville d'Al Hoceima a connu en 1994 un tremblement de terre qui a fait **deux morts** et des dégâts importants. La population a été questionnée et à chaque ville ou village a été attribué un chiffre correspondant à un degré de **l'intensité** sur l'échelle **MSK**.



4- Etude macrosismique

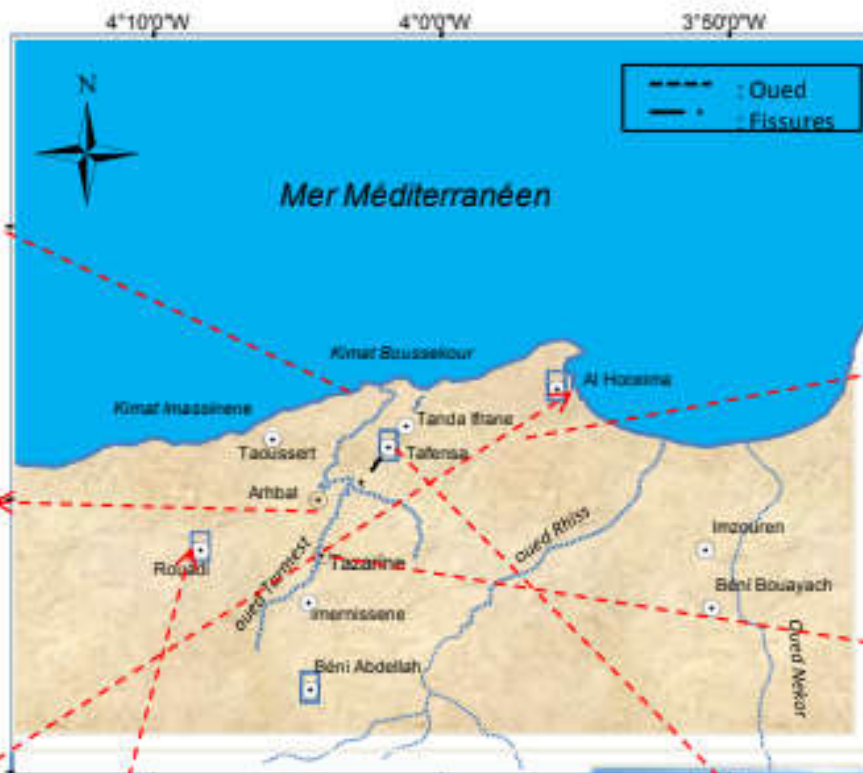
Exemple d'application: *Séisme d'Al Hoceima 1994. les effets observés sur le terrain*



Les éboulements rocheux
et les glissements de terrain



Constructions en Béton endommagés par le séisme



Destructions des constructions
rurales

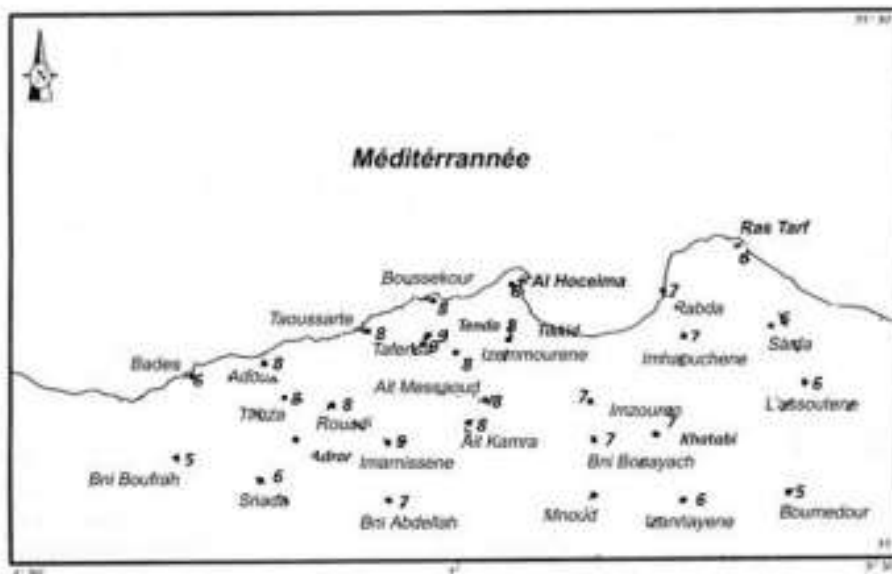


Les fissures dans le sol

4- Etude macrosismique

Exemple d'application: *Séisme d'Al Hoceima 1994. les Intensités évaluées*

Localité (pts d'observation)	intensité	Localité	intensité	Localité	intensité
Al Hoceima	8 - VIII	Tafensa	9 IX	Izemourene	8- VIII
Taousserte	8- VIII	Adouz	8 - VIII	Tirhza	8- VIII
Rouadi	8- VIII	Imarnissene	8 - VIII	Ait Kamra	8- VIII
Imzouren	7- VII	BniBouayach	7- VII	Mnoud	7- VII
Ait Messaoud	8- VIII	Snada	6-VI	Bniboufrah	5-V
L'assoutene	6-VI	Boumeddour	5-V	Rabda	7- VII
Ras Tarf	6-VI	Saida	6-VI	Imhaouchene	7- VII
Izannayene	6-VI	Bades	6-VI	Boussekour	8- VIII
Adrar	7- VII	Tenda	9 IX	Khatabi	7- VII
Tikkid	8- VIII				



Après avoir évaluer les intensités dans chaque points d'observation, et en se servant des échelles d'intensité, on insère sur la carte de la région, et sur chaque point d'observation les intensités évaluées.

4- Etude macrosismique

Exemple d'application: *Séisme d'Al Hoceima 1994. la carte des isoséistes*

Localité (pts d'observation)	intensité	Localité	intensité	Localité	Intensité
Al Hoceima	8 - VIII	Tafensa	9 IX	Izemmourene	8- VIII
Taousserte	8- VIII	Adouz	8 - VIII	Tirhza	8- VIII
Rouadi	8- VIII	Imarnissene	8 - VIII	Ait Kamra	8- VIII
Imzouren	7- VII	BniBouayach	7- VII	Mnoud	7- VII
Ait Messaoud	8- VIII	Snada	6-VI	Bniboufrah	5-V
L'assoutene	6-VI	Boumeddour	5-V	Rabda	7- VII
Ras Tarf	6-VI	Saida	6-VI	Imhaouchene	7- VII
Izannayene	6-VI	Bades	6-VI	Boussekour	8- VIII
Adrar	7- VII	Tenda	9 IX	Khatabi	7- VII
Tikkid	8- VIII				



La carte des isoséistes a été réalisée en reliant par des lignes les points qui ont la même valeur d'intensité.

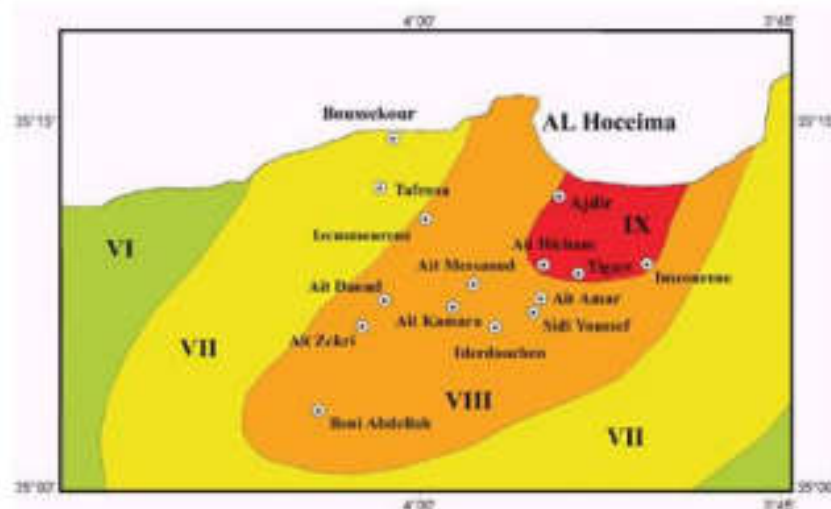
4- Etude macrosismique

d – Données tirées des cartes d'isoséistes :

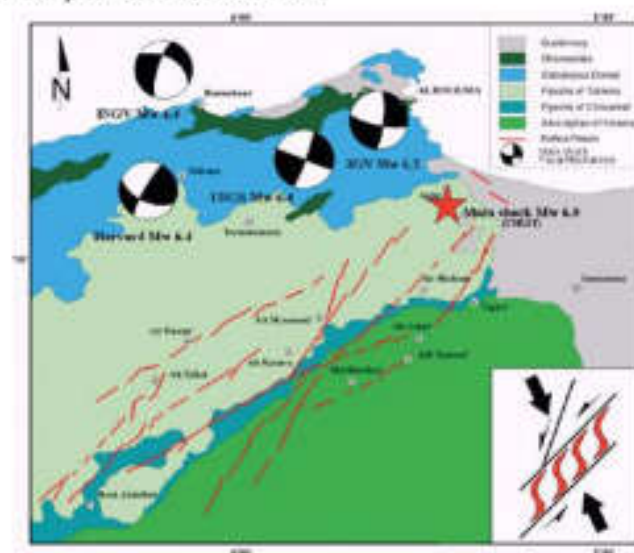
- * nous donne une connaissance sur les zones les plus **dangereuses** pour en tenir compte lors des projets de construction
- * la mise en évidence des **failles invisibles** à la surface mais pouvant être révélées par une forme particulière des courbes d'isoséistes.
- * L'évaluation de **la profondeur du foyer** à partir de l'écartement des courbes. La distance entre l'épicentre et une courbe isoséiste donnée augmente avec la profondeur du foyer.

4- Etude macrosismique

c – Données tirées des cartes d'isoséistes : **direction de la faille** responsable du séisme



L'allongement des courbes d'isoséistes du séisme d'Al Hoceima 2004 suivant la **direction NE-SW** est parallèle avec la direction de la **faille** qui a produit le séisme.



4- Etude macrosismique

c – Données tirées des cartes d'isoséistes : Estimation de La profondeur du Foyer

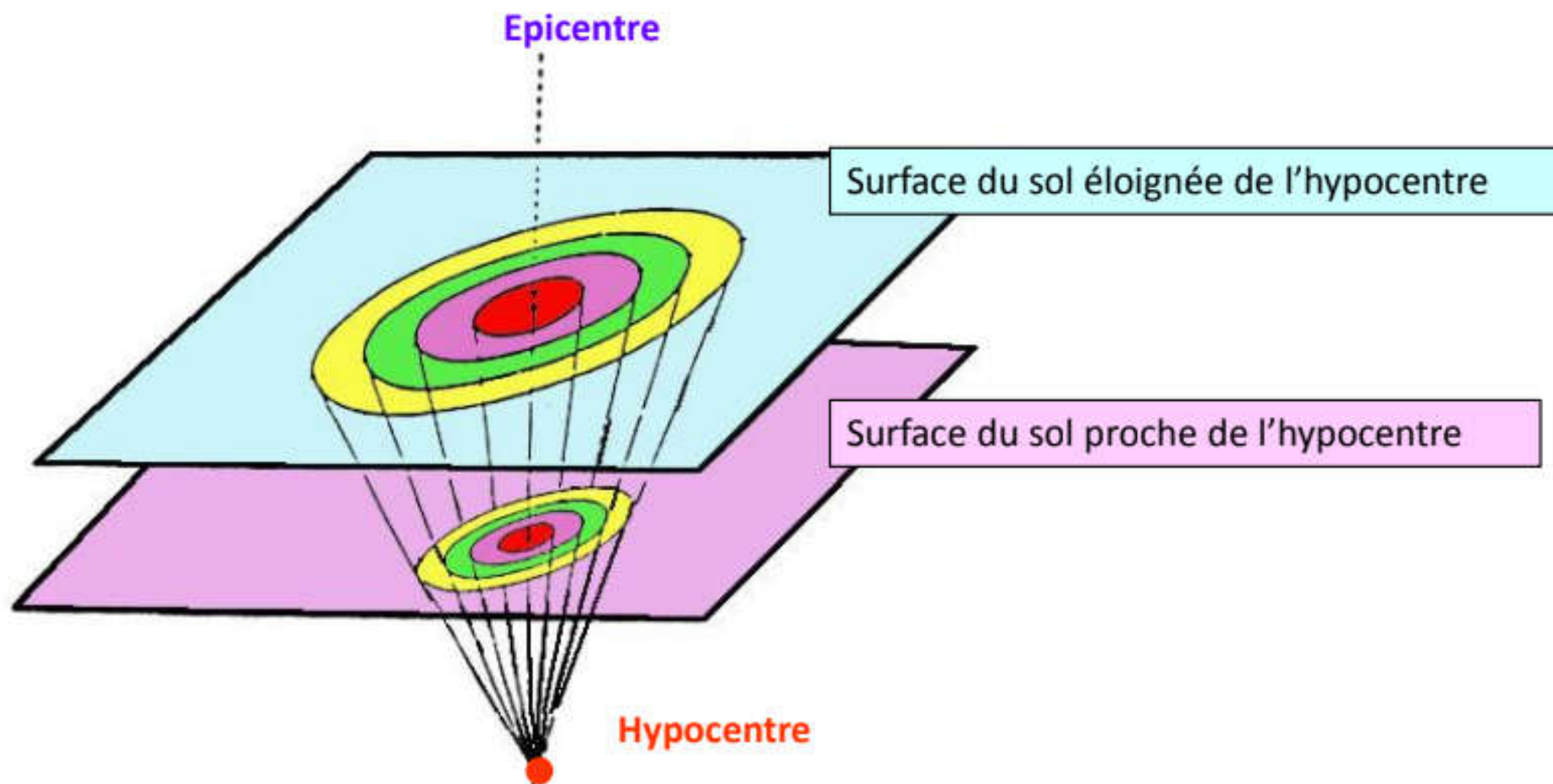
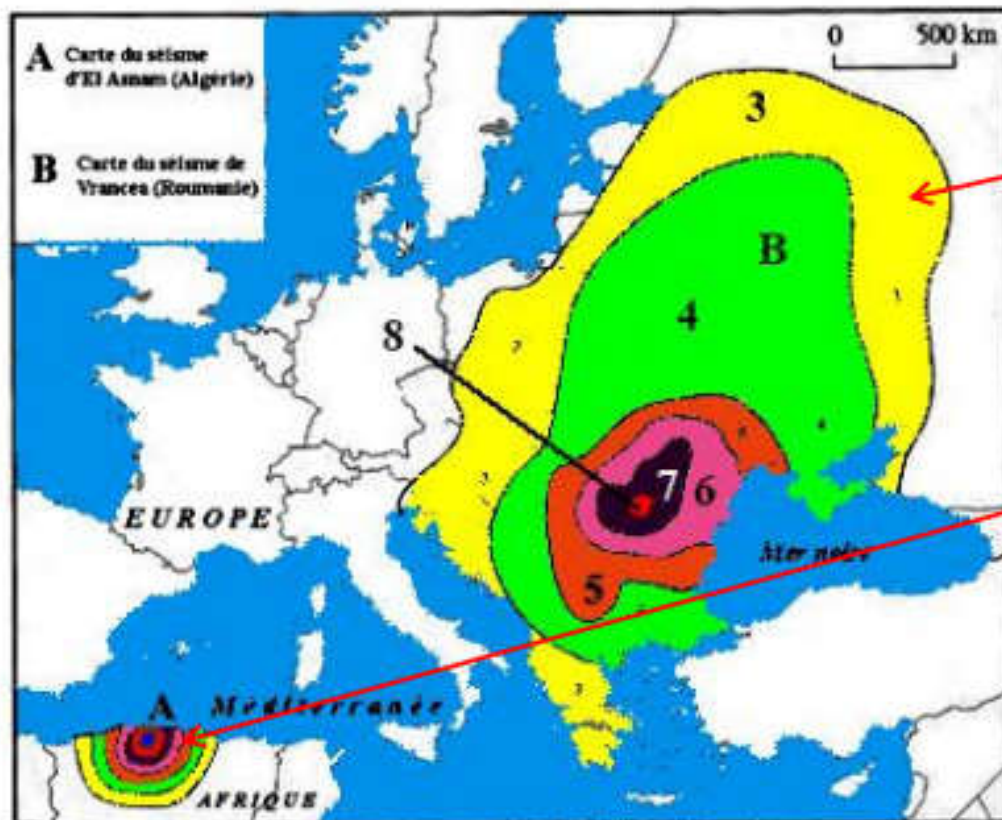


Schéma montrant les rapports entre la profondeur du foyer et l'espacement des lignes isoséistes.

4- Etude macrosismique

c – Données tirées des cartes d'isoséistes : Estimation de La profondeur du Foyer



Isoseistes écartées pour le séisme B, qui a une profondeur du Foyer égale à **100 km**.

Isoseistes très rapprochées pour le séisme A, qui a une profondeur du Foyer égale à **10 km**.

A Séisme d'Al Asnam (Algérie) de 1980	B Séisme de Vrancea (Roumanie) de 1977
M : 7.3	M : 7.2
Profondeur du foyer : 10 Km	Profondeur du foyer : 100 km

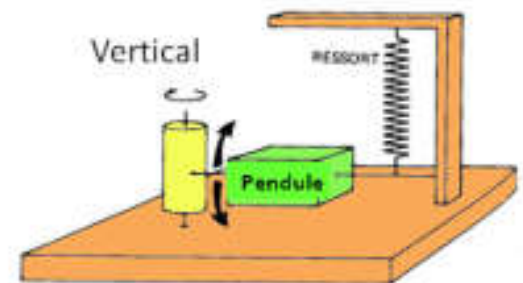
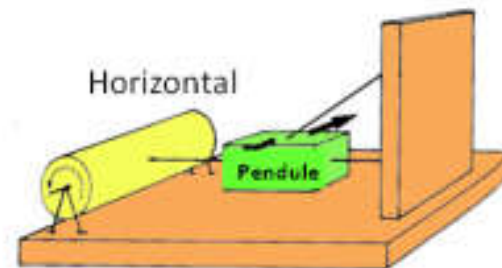
Carte des isoséistes de deux séismes: **A** en En Algérie, **B** en Roumanie.

5. Etude instrumentale des séismes

a – Enregistrement des ondes sismiques :

a1 – Les sismomètres

Les sismomètres sont des appareils très sensibles destinés à mesurer **le mouvement du sol**. En théorie, on dispose d'un pendule très lourd ayant donc une **forte inertie**, attaché à un support solidaire du sol. Lorsque le sol bouge, le support le suit immédiatement, mais le pendule ne le fait qu'avec **retard**. Il est alors déséquilibré et retrouve son équilibre après quelques **oscillations**. Cette masse est munie d'un stylet, elle inscrira donc sur un rouleau enregistreur une courbe. Plus le déplacement du sol sera important plus l'amplitude sera grande. Le graphique obtenu est appelé **sismogramme**.

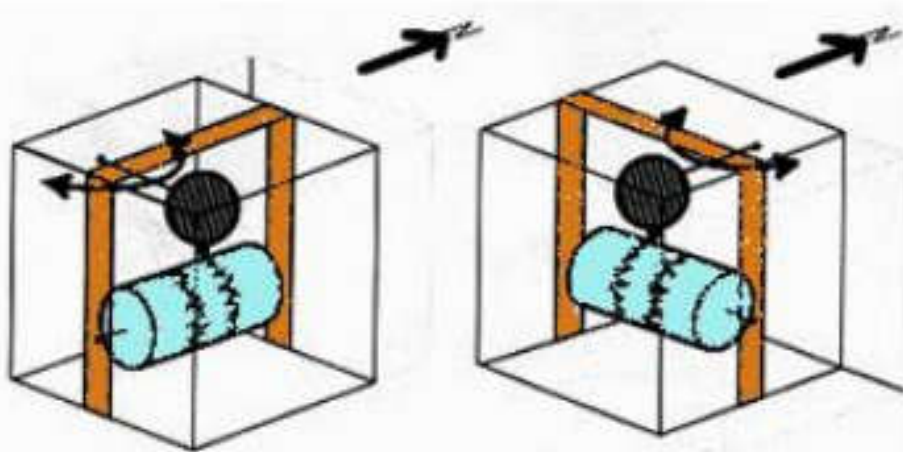


5. Etude instrumentale des séismes

a – Enregistrement des ondes sismiques :

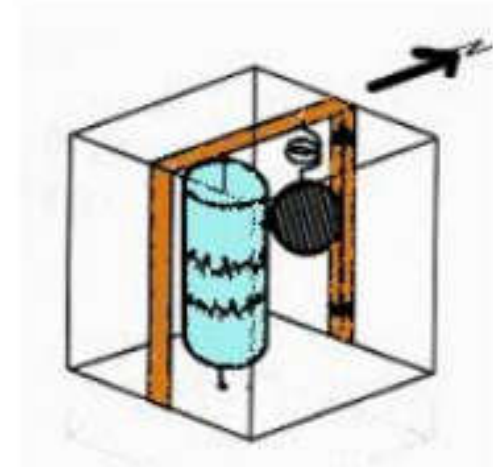
a1 – Les sismomètres

Chaque station est muni de **trois** sismomètres: **deux** qui enregistrent les **mouvements horizontaux** placés perpendiculairement l'un par rapport à l'autre NS et EW et **un** qui enregistre les **mouvements verticaux**.



1 : sismomètres à déplacement horizontal

Sont disposés de tel sorte qu'on enregistre la composante **X** (Nord-Sud) et la composante **Y** (Est-Ouest)



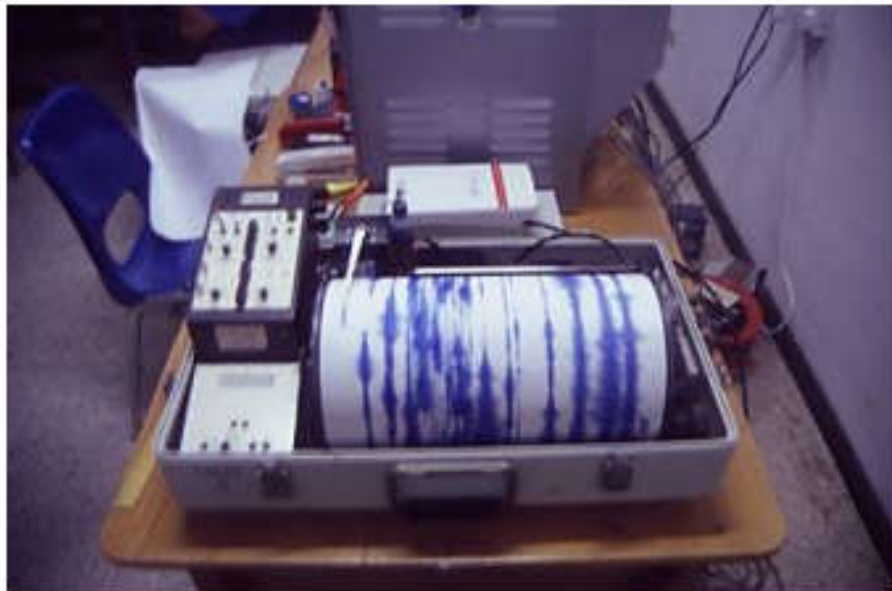
2 : sismomètre à déplacement vertical

est disposés de tel sorte qu'on enregistre la composante **Z**.

5. Etude instrumentale des séismes

a – Enregistrement des ondes sismiques :

a1 – Les sismomètres



Sismomètre portable



Sismomètres d'un réseau sismologique

5. Etude instrumentale des séismes

a – Enregistrement des ondes sismiques :

a2 – Le sismogramme

Un sismogramme est l'enregistrement obtenu à partir des sismomètres. La **forme** d'un sismogramme varie en fonction :

- De **l'énergie libérée** au foyer sous la forme d'onde sismique;
- De la **distance foyer- station** sismographique;
- De la **nature** et de la structure du milieu traversé par les ondes et,
- Du **type de sismographe** utilisé.

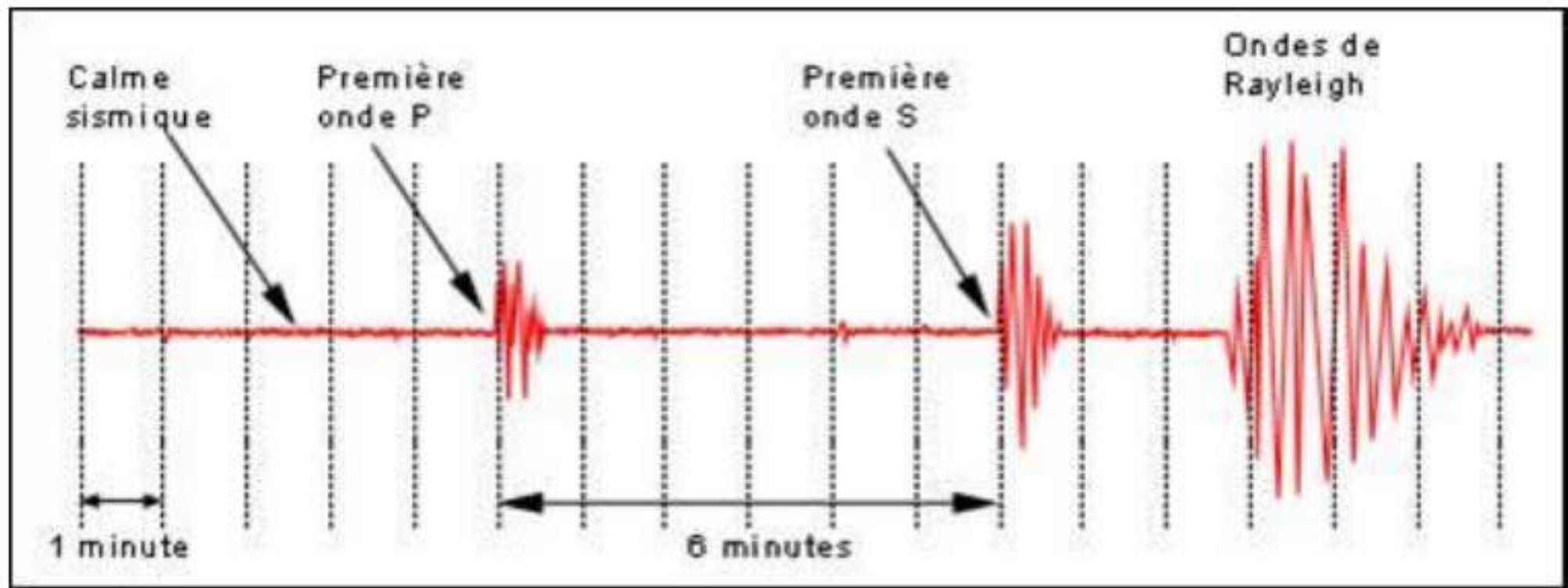
Malgré la complexité des sismogrammes, les sismologues parviennent à y distinguer deux, parfois trois secteurs principaux; le début de chacun de ces secteurs correspond à une brusque augmentation de l'amplitude du mouvement enregistré. Ces secteurs correspondent aux arrivées successives et toujours dans le même ordre parfois trois trains d'ondes:

- Les **ondes P**, ainsi appelées parce qu'elles arrivent les premières;
- Les **ondes S**, ainsi appelées parce qu'elle arrivent les secondes;
- Les ondes **de longue période** appelées aussi ondes de surface

5. Etude instrumentale des séismes

a – Enregistrement des ondes sismiques :

a2 – Le sismogramme

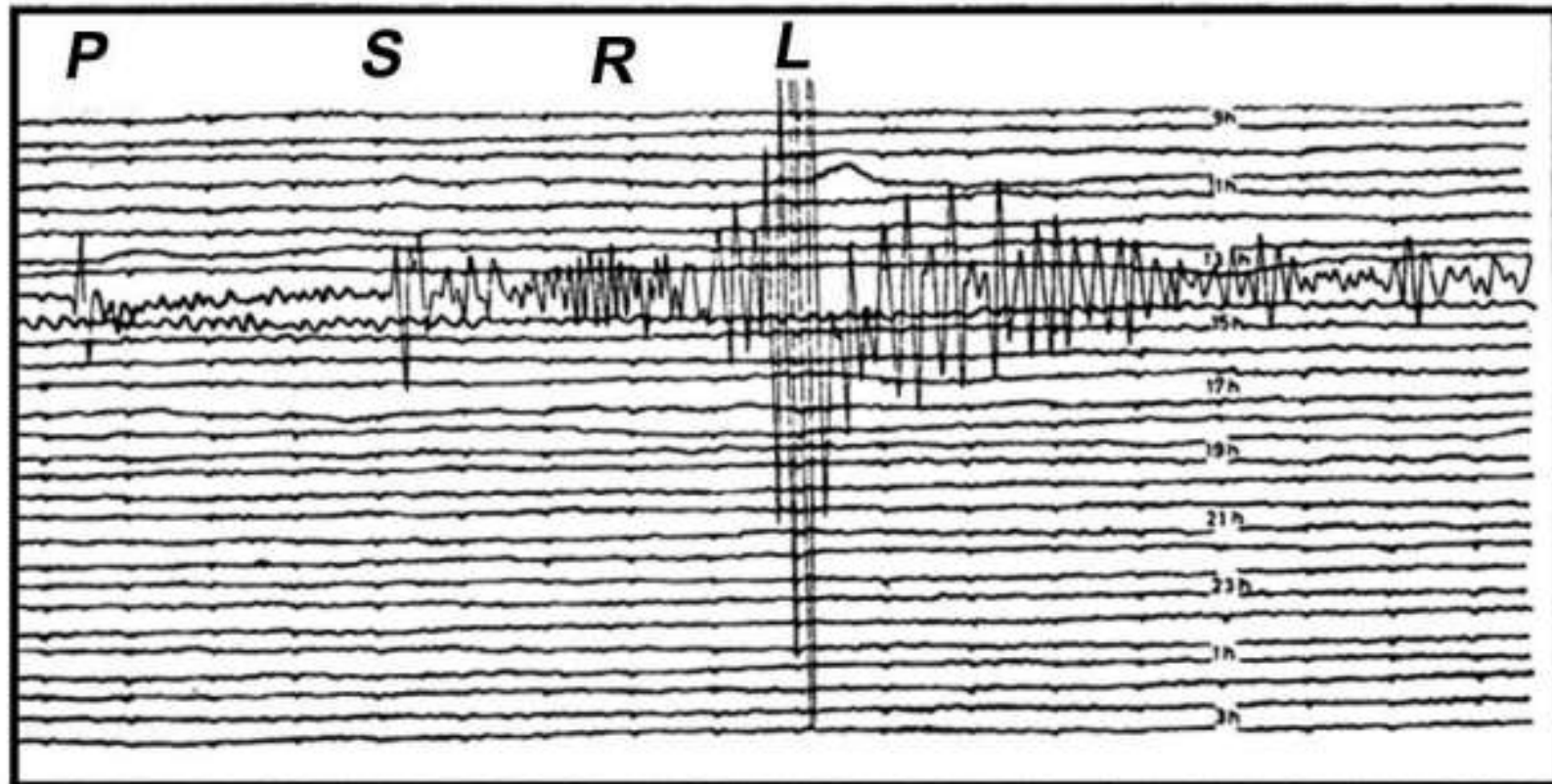


Les types d'onde sismique

5. Etude instrumentale des séismes

a – Enregistrement des ondes sismiques :

a2 – Le sismogramme

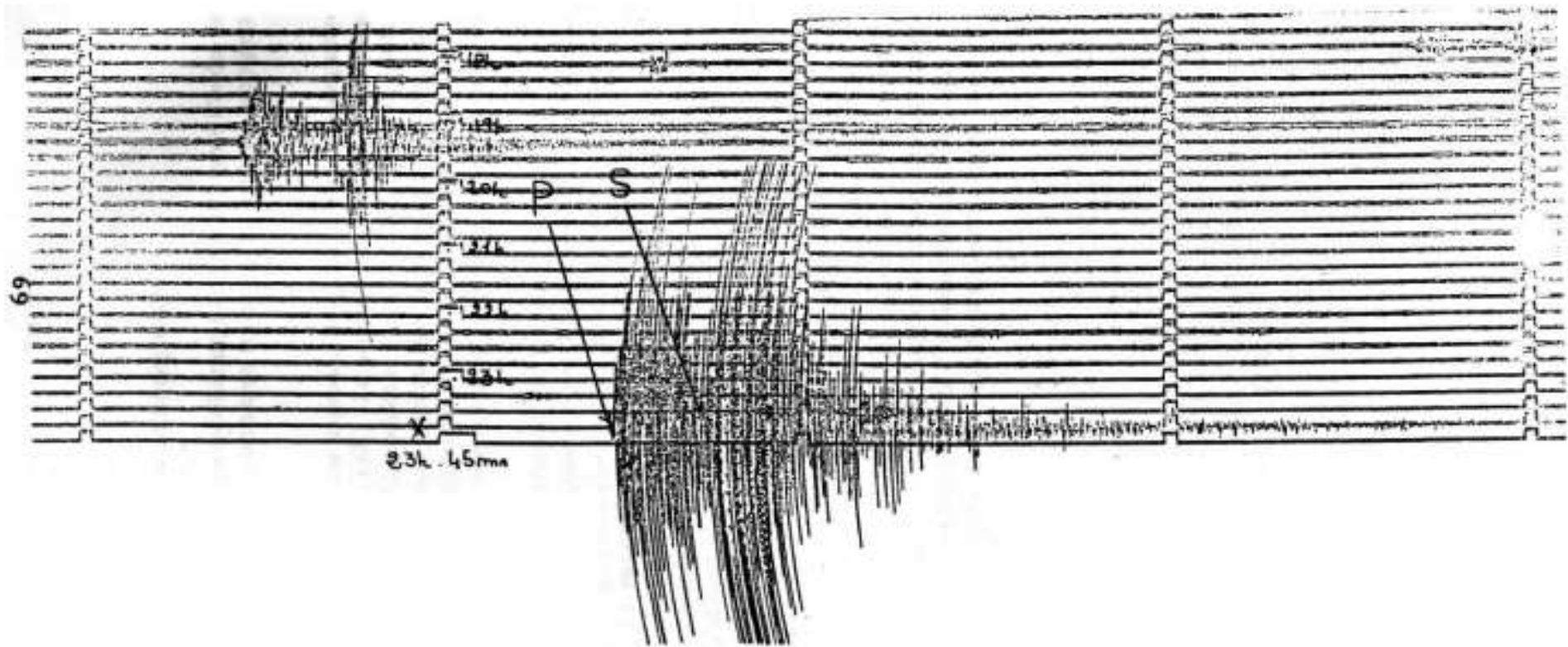


Exemple de sismogramme : Séisme du 25 mars 1969
Enregistré à la station de Garchy (Nièvre) à **2216 km** de l'épicentre
Situé en Turquie

5. Etude instrumentale des séismes

a – Enregistrement des ondes sismiques :

a2 – Le sismogramme

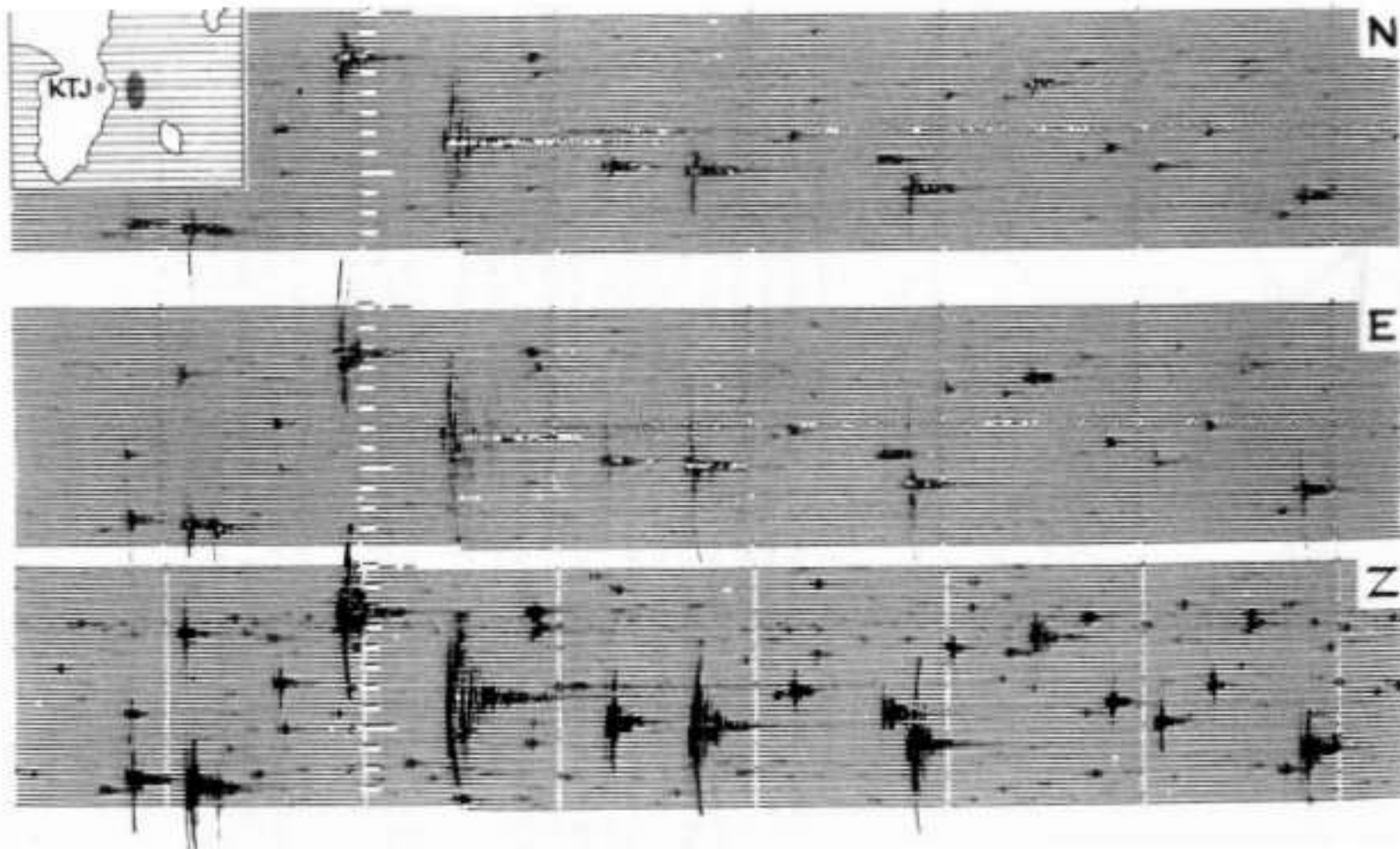


Exemple de **sismogramme** : réplique du séisme d'Al Hoceima 1994 enregistré à la station télémétrée de Tazeka à **120 km** de l'épicentre
Situé près d'Al Hoceima

5. Etude instrumentale des séismes

a – Enregistrement des ondes sismiques :

a2 – Le sismogramme

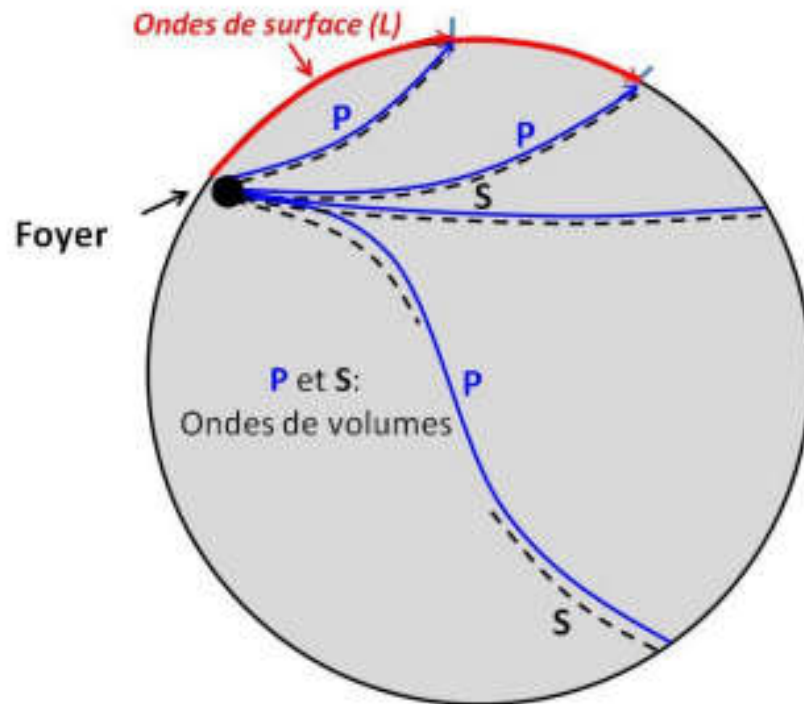


Exemple des sismogrammes : *les répliques*

5. Etude instrumentale des séismes

a – Enregistrement des ondes sismiques :

a3 – Les caractéristiques des ondes sismiques



Les ondes P et S partent du foyer du séisme et se propagent dans toute les directions avant d'arriver à la surface. Pour cette raison elles sont appelées **ondes de volumes**.

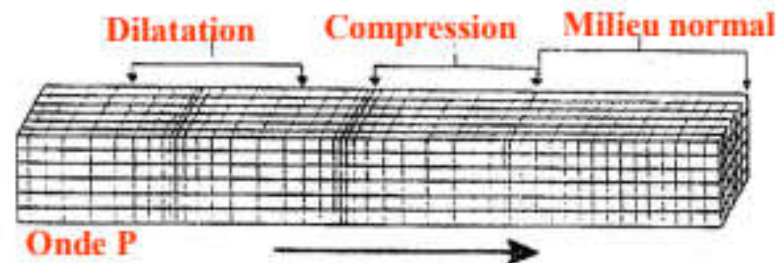
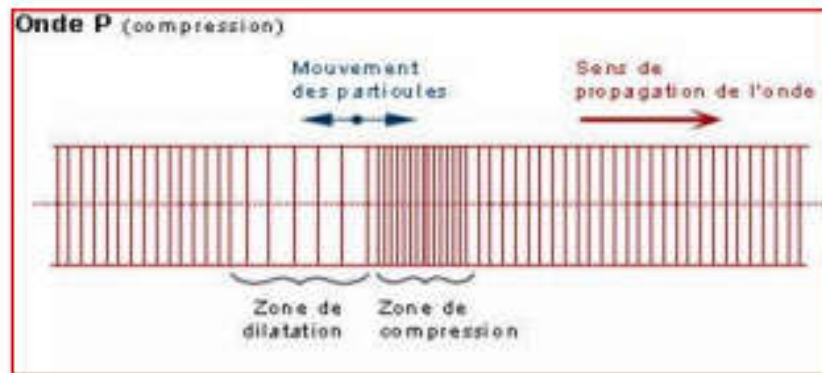
Les ondes L se propagent à la surface ou près de la surface et sont donc appelées **ondes de surface** (ou ondes superficielles)

5. Etude instrumentale des séismes

a – Enregistrement des ondes sismiques :

a3 – Les caractéristiques des ondes sismiques

Les ondes P



Les ondes P sont des ondes longitudinales. Elles font vibrer les particules du milieu le long de la direction de leur propagation. On les appelle aussi ondes de compression- dilatation parce que leur propagation se traduit par des compressions et dilatations successives du milieu.

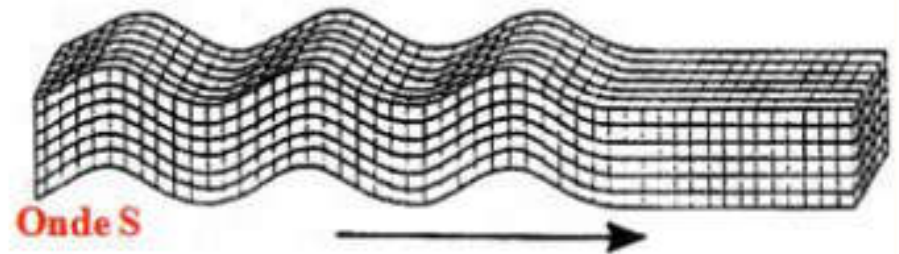
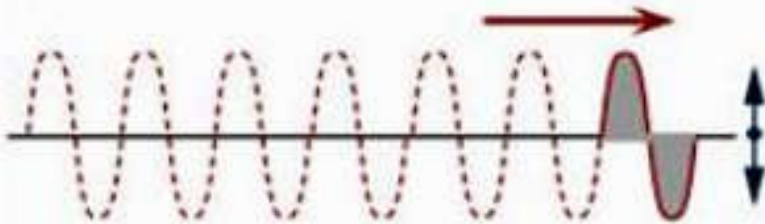
5. Etude instrumentale des séismes

a – Enregistrement des mouvements sismiques :

a3 – Les caractéristiques des ondes sismiques

Les ondes S

Onde S (cisaillement)



Les ondes S sont des **ondes transversales**; A leur passage les particules du milieu vibrent dans un plan vertical **perpendiculairement** à la direction de propagation, donc transversalement par rapport à cette direction.

Les ondes S ne se propagent **que dans les solides**, elles ne se propagent ni dans les liquides, ni dans les gaz

5. Etude instrumentale des séismes

a – Enregistrement des ondes sismiques :

a3 – Les caractéristiques des ondes sismiques

Les ondes L

Les ondes de longues périodes (= ondes de surface) sont de deux types : les ondes de Love ou ondes Q et les ondes de Rayleigh ou ondes R

- Les ondes de Love : sont des ondes transversales comme les ondes S mais les vibrations des particules du milieu ne se font que dans le seul plan horizontal; elles ne peuvent se propager que dans **les solides**.

Onde L (de Love) (cisaillement)



Onde de Love

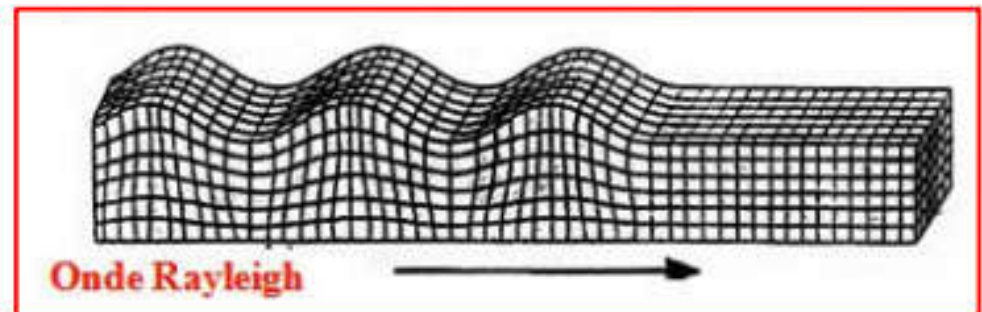
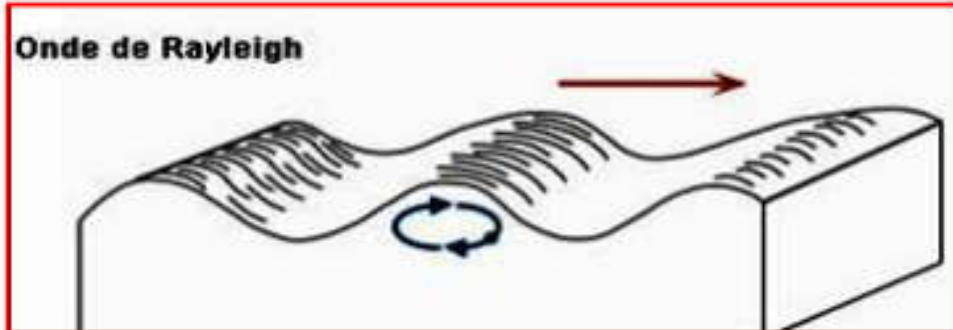
5. Etude instrumentale des séismes

a – Enregistrement des ondes sismiques :

a3 – Les caractéristiques des ondes sismiques

Les ondes L

Les ondes de Rayleigh sont transmissibles par les solides et les liquides. Les particules du milieu décrivent, en tournant dans le sens rétrograde par rapport au sens de propagation des ellipses allongées verticalement.



5. Etude instrumentale des séismes

a – Enregistrement des mouvements sismiques :

a4 – La vitesse des ondes sismiques : Courbes des hodochrones (temps – distance).

Lors d'un **tremblement de terre** (ou d'un **séisme artificielle**), si l'on dispose de plusieurs stations réceptrices, il est possible de calculer la **vitesse des différents ondes** en tenant compte de la distance et de l'heure d'arrivée.

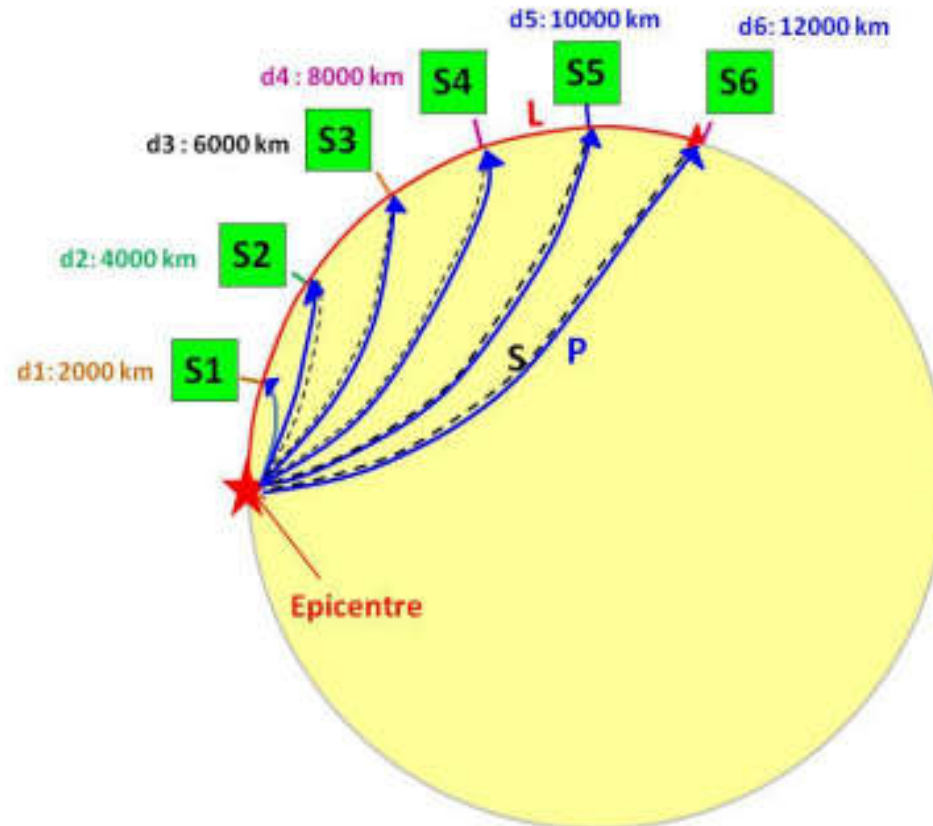
Les enregistrements des ondes sismiques réalisés dans diverses stations sismiques à la surface du globe, et issus de multiples séismes aux localisations très diversifiées, ont permis la construction des tables et d'hodographes qui sont tous très **semblables**. Ceci permet de formuler l'hypothèse d'une **symétrie sphérique** pour l'organisation interne du globe.

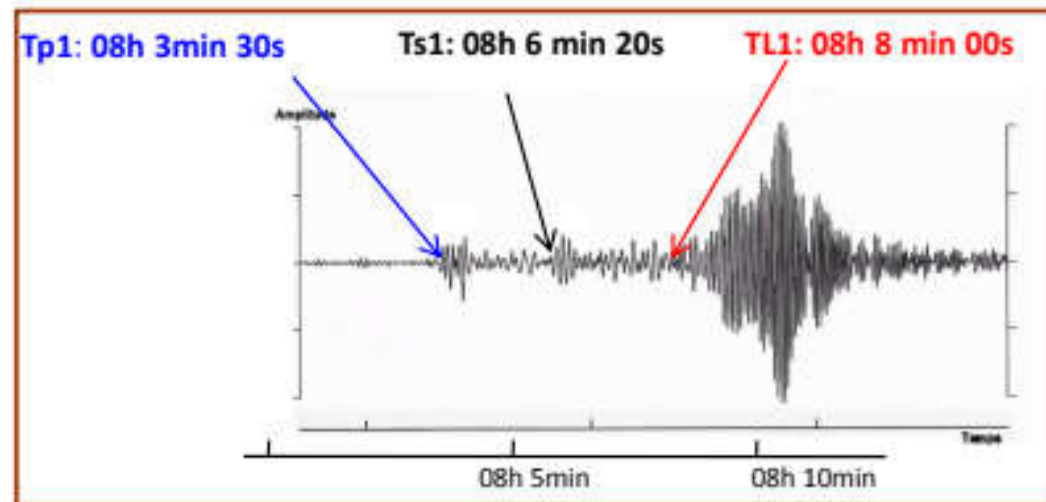
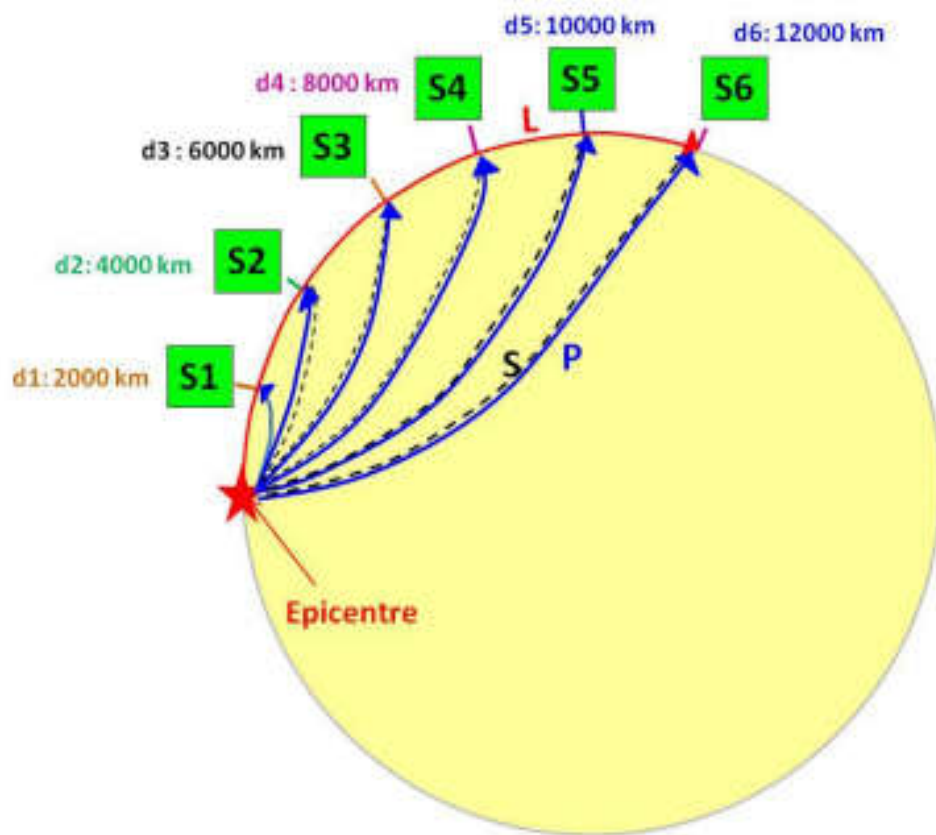
Méthode simple pour Calculer les vitesses des ondes sismique

Un séisme a eu lieu à **8h 00 min = T0**. On veut calculer les vitesses des ondes sismiques **P**, **S** et **L**, issues de ce séisme, sachant qu'on connaît la localisation de son épicentre. les stations sismiques sont déjà placées, donc on connaît la distance station-épicentre en km.

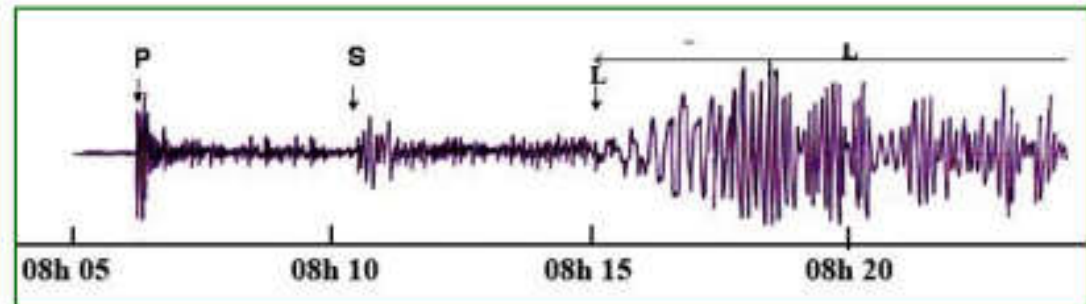
dS1 = 2000 km, dS2 = 4000km, dS3 = 6000 km, dS4 = 8000 km, dS5 = 10000 km

On récupère les temps d'arrivées des trois ondes sismiques P, S et L pour chaque stations (S1, S2, S3, S4, S5, etc.) à partir des sismogrammes .

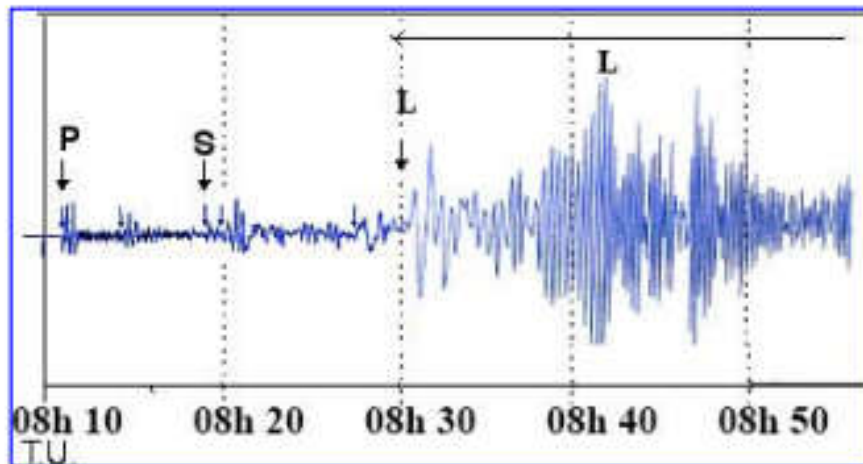




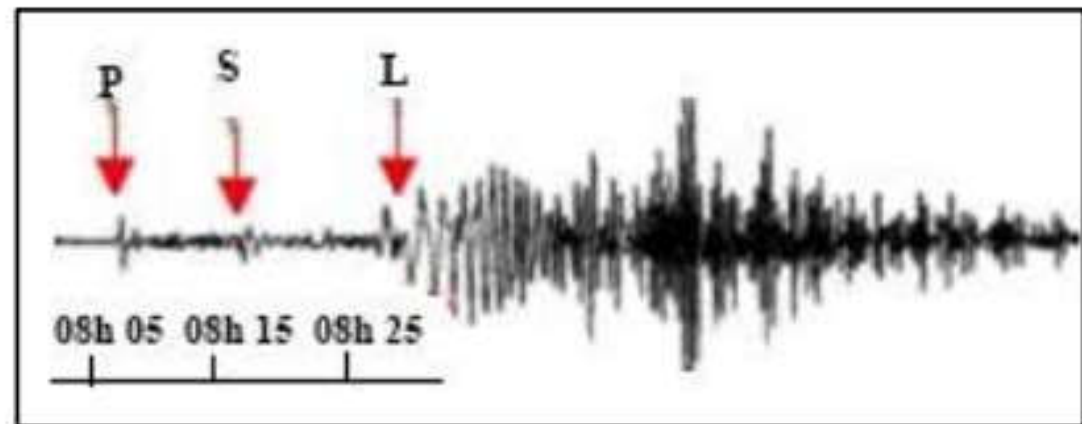
Sismogramme de la Station S1



Sismogramme de la Station S2



Sismogramme de la Station 4



Sismogramme de la Station 3

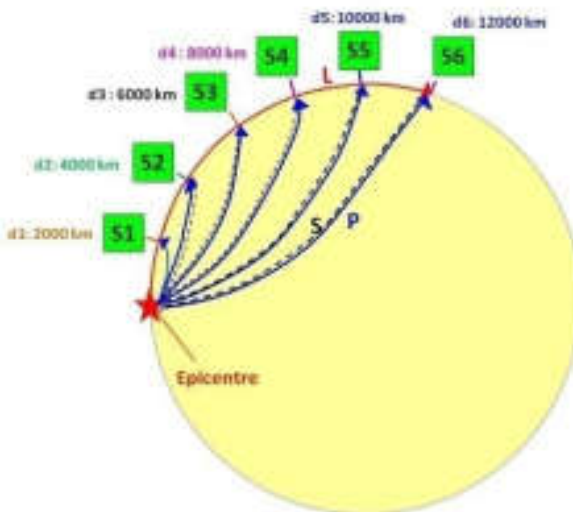
Méthode simple pour Calculer les vitesses des ondes sismique

$$\begin{aligned} VP1 &= d1/TP1-T0, & VP2 &= d2/TP2-T0, & VP3 &= d3/TP3-T0 \\ VS1 &= d1/TS1-T0, & VS2 &= d2/TS2-T0, & VS3 &= d3/TS3-T0 \\ VL1 &= d1/TL1-T0, & VL2 &= d2/TL2-T0, & VL3 &= d3/TL3-T0 \end{aligned}$$

Vitesse = distance/temps

Avec $TP1, TP2, TP3$ sont les arrivées de l'onde P respectivement aux stations $S1, S2$ et $S3$
 $TS1, TS2, TS3$ sont les arrivées de l'onde S respectivement aux stations $S1, S2$ et $S3$
 $TL1, TL2, TL3$ sont les arrivées de l'onde L respectivement aux stations $S1, S2$ et $S3$

En Temps universelle
Heures, minutes, secondes.



Exemple pour la **station 1**, on a :

$d1= 2000$ km, $T0 = 8h\ 00min\ 00sec$

$TP1: 08h\ 3min\ 30s$

$Ts1: 08h\ 6\ min\ 20s$

$TL1: 08h\ 8\ min\ 00s$

$$\begin{aligned} VP1 &= d1/TP1-T0 = 2000/ 08h\ 3min\ 30s - 08h\ 00\ min = \\ &= 2000/3min\ 30\ s = 2000/ (3 \times 60)\ sec + 30\ sec = 2000/210 = \mathbf{9,52\ km/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} VS1 &= d1/TS1-T0 = 2000/ 08h\ 6min\ 20s - 08h\ 00\ min = \\ &= 2000/6min\ 20\ s = 2000/ (6 \times 60)\ sec + 20\ sec = 2000/380s = \mathbf{5,26\ km/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} VL1 &= d1/TL1-T0 = 2000/ 08h\ 8min\ 00s - 08h\ 00\ min = \\ &= 2000/8min = 2000/ (8 \times 60)\ sec = 2000/480s = \mathbf{5,16\ km/s} \end{aligned}$$

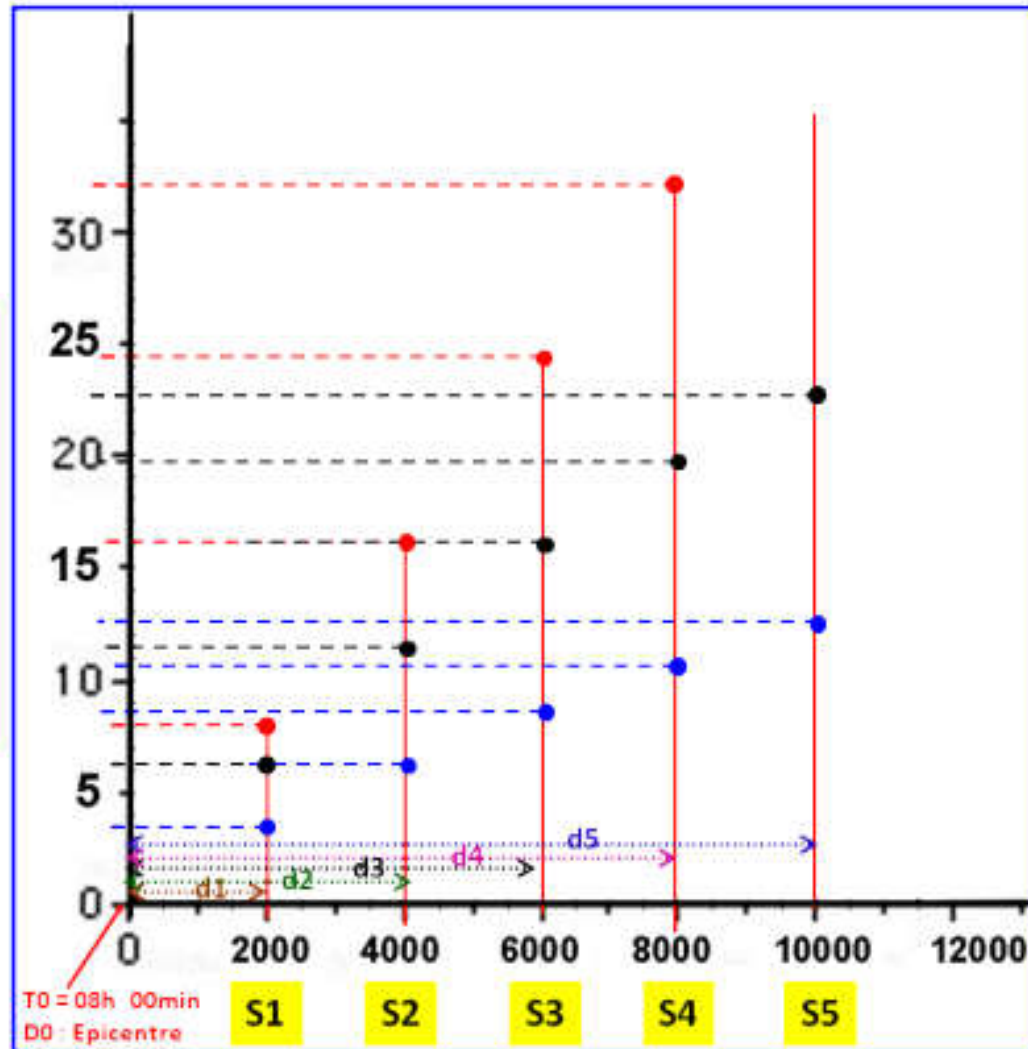
Méthode simple pour Calculer les vitesses des ondes sismique

les vitesses des trois ondes sismiques sont calculées, à partir des données disponibles pour chaque station d'enregistrements. Le tableau ci-dessous, regroupe tous les données relatives à ce séisme ainsi que les vitesses des ondes calculées pour chaque stations.

T0 = 08 h 00 min 00 sec

Station	TP(en h, min, sec)	TS(en h, min, sec)	TL(en h, min, sec)	TP-T0 (en min ou en sec)	TS-T0 (en min ou en sec)	TL-T0 (en min ou en sec)	TS-TP	Distance épicentrale (en km ou en degré)	Vitesse de l'onde P (en km/s)	Vitesse de l'onde S (en km/s)	Vitesse de l'onde L (en km/s)
S1	08h 3min 30s	08h 6 min 20s	08h 8min 00s	3min 30s	6 min 20s	8min 00s	2min 50 sec	d1 = 2000	9,52	5,26	4,16
S2	08h 6 min 15s	08h 11 min 30s	08h 16 min 00s	6 min 15s	11 min 30s	16 min 00s	5min 15 Sec	d2 = 4000	10,66	5,8	4,16
S3	08h 8 min 30s	08h1 6 min 00s	08h 24 min 30s	8 min 30s	1 6 min 00s	24 min	7min 30s	d3= 6000	11,76	6,25	4,16
S4	08h 10 min 45s	08h 19 min 50s	08h 32 min 00s	10 min 45s	19 min 50s	32 min 00s	9min 5sec	d4= 8000	12,4	6,72	4,16
S5	08h 12 min 30s	08h 22 min 50s		12 min 30s	22 min 50s		10 min 20 sec	d5= 10000	13,3	7,29	

Méthode simple pour Calculer les vitesses des ondes sismique



On peut traduire les résultats des calculs des vitesses du tableau précédent, en traçant sur un hodographe les courbes de vitesses appelées hodochrones.

On Commence par dessiner les axes X et Y de références:

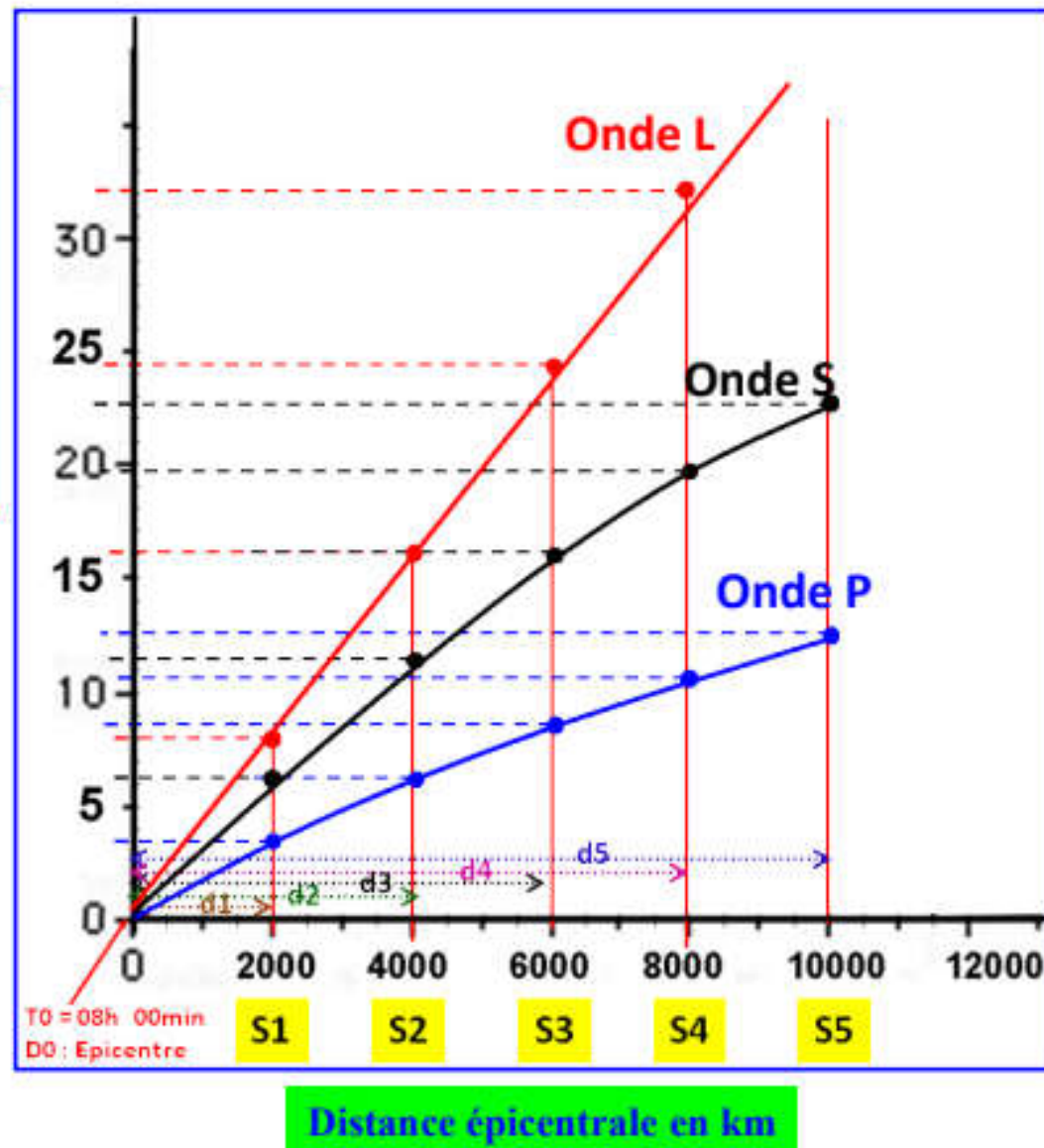
L'axe X : Distance épicentrale en km,

L'axe Y: Durée du trajet de l'onde en min

Lorsque le séisme prend naissance, à l'épicentre (lieu d'origine) et en T_0 (l'heure d'origine), les vitesses des ondes sismiques P, S et L commencent à se propager, en arrivant à chaque Station, elles auront parcourues les distances épicentrales ($d_1, d_2, \dots$) avec des durées qui représentent la différences des temps d'arrivées à chaque station et le temps d'origine T_0 .

On projette donc sur le graphe les points d'intersections entre la ligne verticale passant par les stations et la ligne horizontale passant par la différence des temps d'arrivées des ondes et T_0 .

Méthode simple pour Calculer les vitesses des ondes sismique



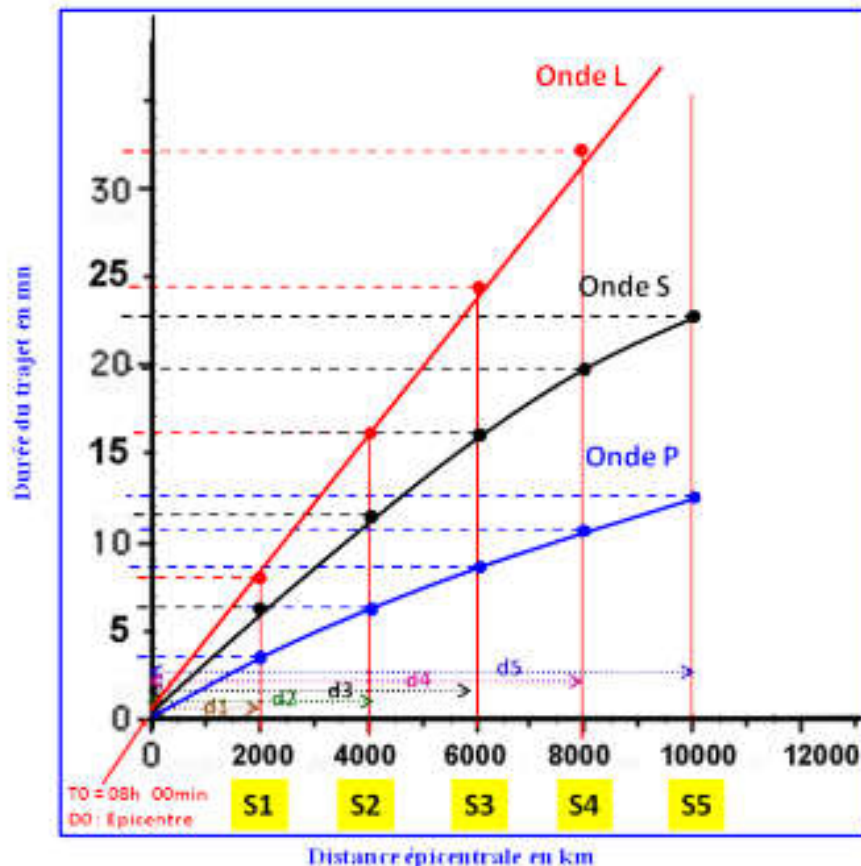
Finalement on trace les courbes des vitesses pour chaque type d'onde, P, S et L en joignant les points d'intersections relatives à chaque type d'onde

Les tables et des hodographes établies à partir de plusieurs séismes sont tous **semblables**. Ceci permet de formuler l'hypothèse d'une **symétrie sphérique** pour l'organisation interne du globe.

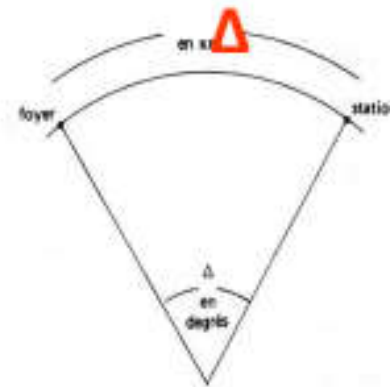
5. Etude instrumentale des séismes

a – Enregistrement des mouvements sismiques :

a4 – La vitesse des ondes sismiques : Courbes des hodochrones (temps – distance).



Courbe de vitesse des différents ondes sismiques



Mesure de Δ , distance épicertrale

Récapitulons: La courbe de vitesses des différents d'ondes sismique (**Hodographe**) montre :

En ordonnée : Le temps (t) qui s'écoule entre l'arrivée des ondes à l'épicentre et leur arrivée aux stations d'enregistrement.

En l'abscisse : La distance entre l'épicentre et les différentes stations, peut être mesurée soit en **Km** soit en **degré** (notée Δ) sur la circonférence terrestre passant par l'épicentre et la station considérée.

5. Etude instrumentale des séismes

a – Enregistrement des ondes sismiques :

a4 – La vitesse des ondes sismiques : Courbes des hodochrones (temps – distance).

Les courbes des hodochrones des ondes sismique a permis de dégager les points suivants:

- Les vitesses sont différentes suivant le type d'onde:

$$V_p > V_s > V_L \text{ avec } V_p/V_s = \sqrt{3}$$

-Les ondes L tracent une droite ce qui montre leur propagation à vitesse constante puisque elles traversent les mêmes milieux (ondes de surface),

- alors que pour les ondes P et S (ondes de volume), elles tracent des courbes inclinées, ce qui montre que la vitesse augmente avec la distance parcouru.

Or la vitesse de propagation étant fonction de la nature et de la densité du milieu traversé ce qui montre une fois de plus que la terre n'est pas un milieu homogène.

$$V_p = \sqrt{\frac{4/3\mu + k}{d}}$$

$$\text{Et } V_s = \frac{\mu}{d}$$

μ

Le coefficient de rigidité du milieu

k

Le coefficient d'incompressibilité du milieu

d

La densité du milieu

5. Etude instrumentale des séismes

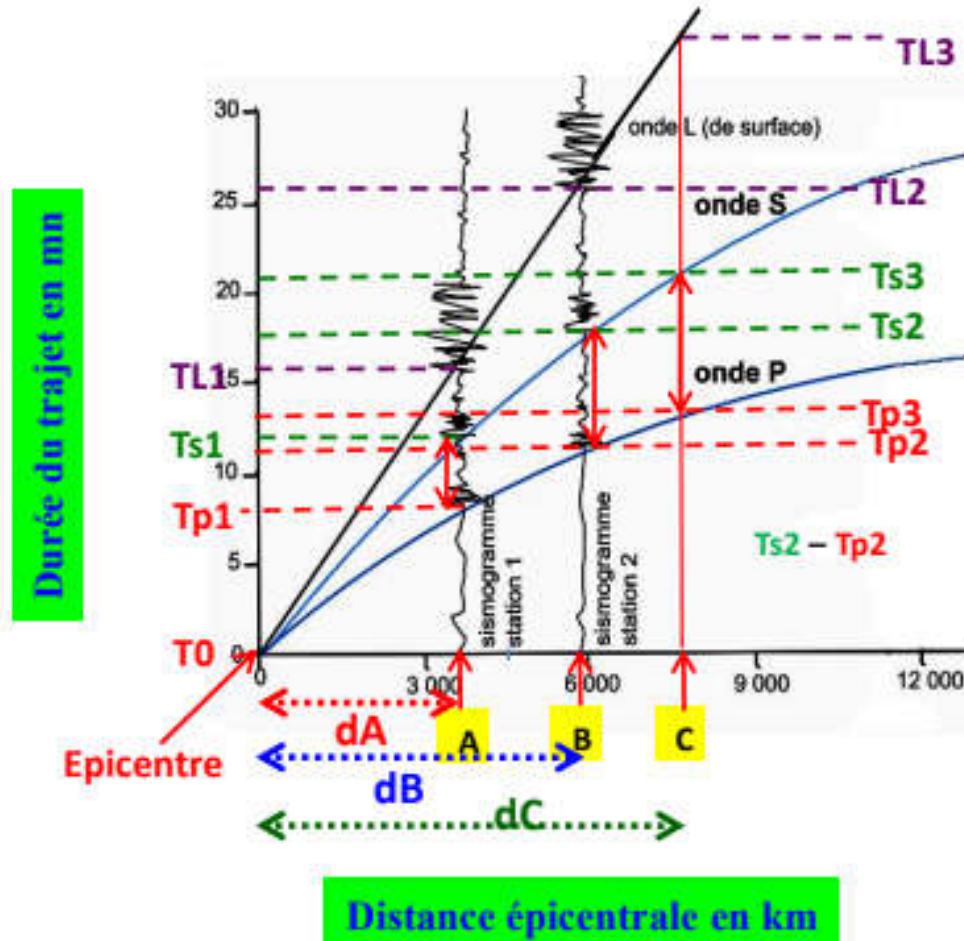
b – Localisation de l'épicentre d'un séisme

Lorsqu'un tremblement de terre se produit, on cherche immédiatement à connaître son **épicentre** et sa **magnitude**. La localisation de l'épicentre est faite grâce à une méthode dite: **intersection des cercles centrés sur les stations**. Si on connaît la différences des temps d'arrivées $T_s - T_p$ d'au moins trois stations, on peut trouver la distance épicentrale en Km de ces trois stations en se servant soit des courbes des hodochrones, soit des tables de références connues, soit à partir des formules mathématiques.

5. Etude instrumentale des séismes

b – Localisation de l'épicentre d'un séisme

Imaginons qu'un séisme a été enregistré par **trois stations** sismiques **A**, **B** et **C**. Sur les sismogrammes de ces stations, on peut lire les valeurs (**ts-tp**) de **A**, (**ts-tp**) de **B** et (**ts-tp**) de **C**. les valeurs trouvées, reportées sur le graphe des hodochrones permettent d'en tirer les distances épicentrales **dA**, **dB** et **dC**.



5. Etude instrumentale des séismes

b – Localisation de l'épicentre d'un séisme

la table la plus utilisée lorsqu'on veut localiser un épicentre d'un séisme est celle de **Jeffrey's Bullen**, qui date de 1940. Elle permet de lire directement la distance épicentrale à partir des différences des temps d'arrivées $T_s - T_p$.

$T_s - T_p$ (en s)	D en km	$T_s - T_p$	D	$T_s - T_p$	D
0,0	00,0	6,5	55,6	14,3	122
0,6	05,6	7,2	61,6	15,0	128
1,3	11,1	7,8	66,7	15,5	131
2,0	16,7	8,4	72,3	16,4	139
3,2	27,8	9,1	77,8	17,7	150
3,9	33,4	9,8	83,4	19	161
4,6	38,9	10,4	89,0	20,4	172
5,0	44,5	11,7	100	25,6	217
5,8	50,0	13,6	117	28,8	245

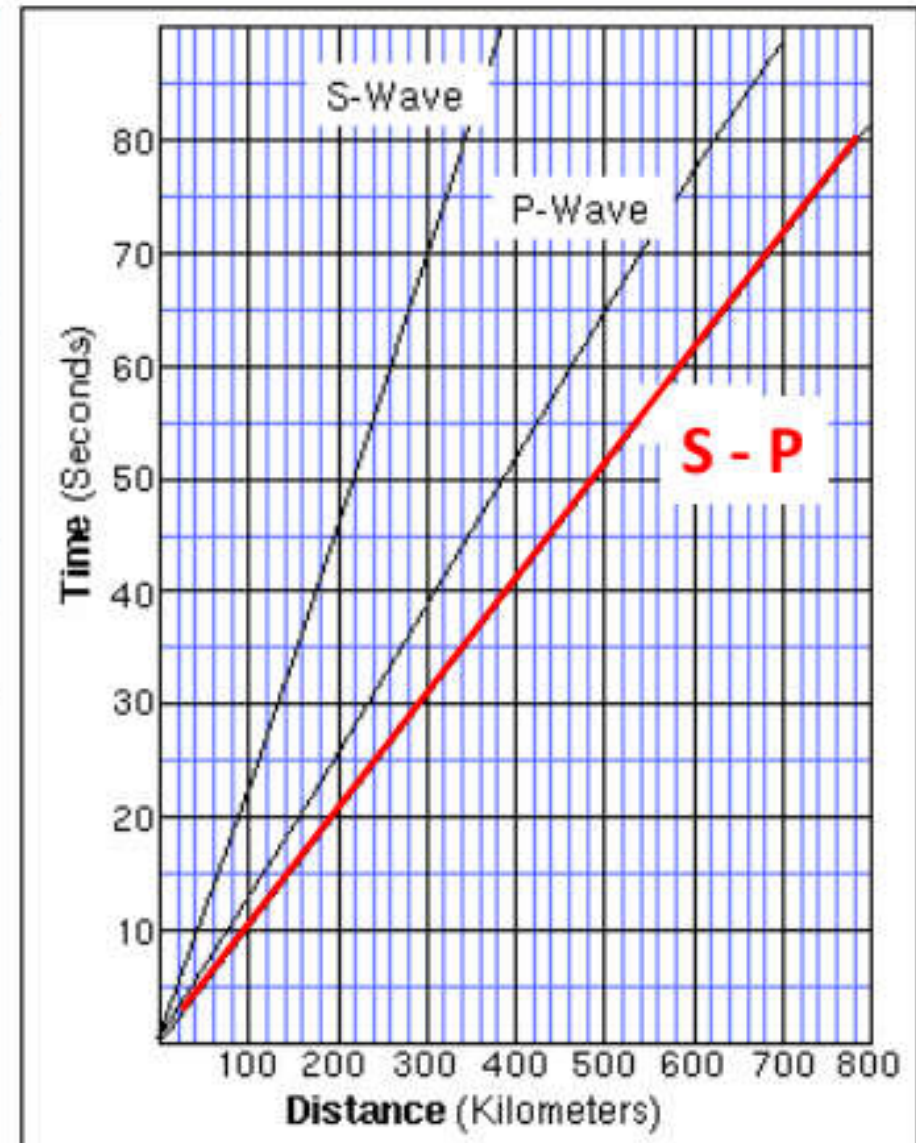
Tableau 1 : Exemple de la table de Jeffreys-Bullen des séismes proches de l'épicentre

5. Etude instrumentale des séismes

b – Localisation de l'épicentre d'un séisme

Ts – Tp (en s)	D en km	Ts – Tp	D	Ts – Tp	D
0,0	00,0	6,5	55,6	14,3	122
0,6	05,6	7,2	61,6	15,0	128
1,3	11,1	7,8	66,7	15,5	131
2,0	16,7	8,4	72,3	16,4	139
3,2	27,8	9,1	77,8	17,7	150
3,9	33,4	9,8	83,4	19	161
4,6	38,9	10,4	89,0	20,4	172
5,0	44,5	11,7	100	25,6	217
5,8	50,0	13,6	117	28,8	245

Tableau 1 : Exemple de la table de Jeffreys-Bullen des séismes proches de l'épicentre



5. Etude instrumentale des séismes

b – Localisation de l'épicentre d'un séisme

On peut également calculer les distances épicentrales à partir des formules qui relient la distance épicentrale aux vitesses des ondes P et aux différences $T_s - T_p$, sachant que les valeurs des vitesses des ondes P et L sont connues à partir des modèles de propagations des vitesses.

$$T_s = T_0 + D/V_s \quad ; \quad T_p = T_0 + D/V_p$$

$$T_s - T_p = (T_0 + D/V_s) - (T_0 + D/V_p) = D/V_s - D/V_p = D(1/V_s - 1/V_p)$$

donc, on aura la formule suivante:

$$D = \frac{T_s - T_p}{(1/V_s - 1/V_p)}$$

5. Etude instrumentale des séismes

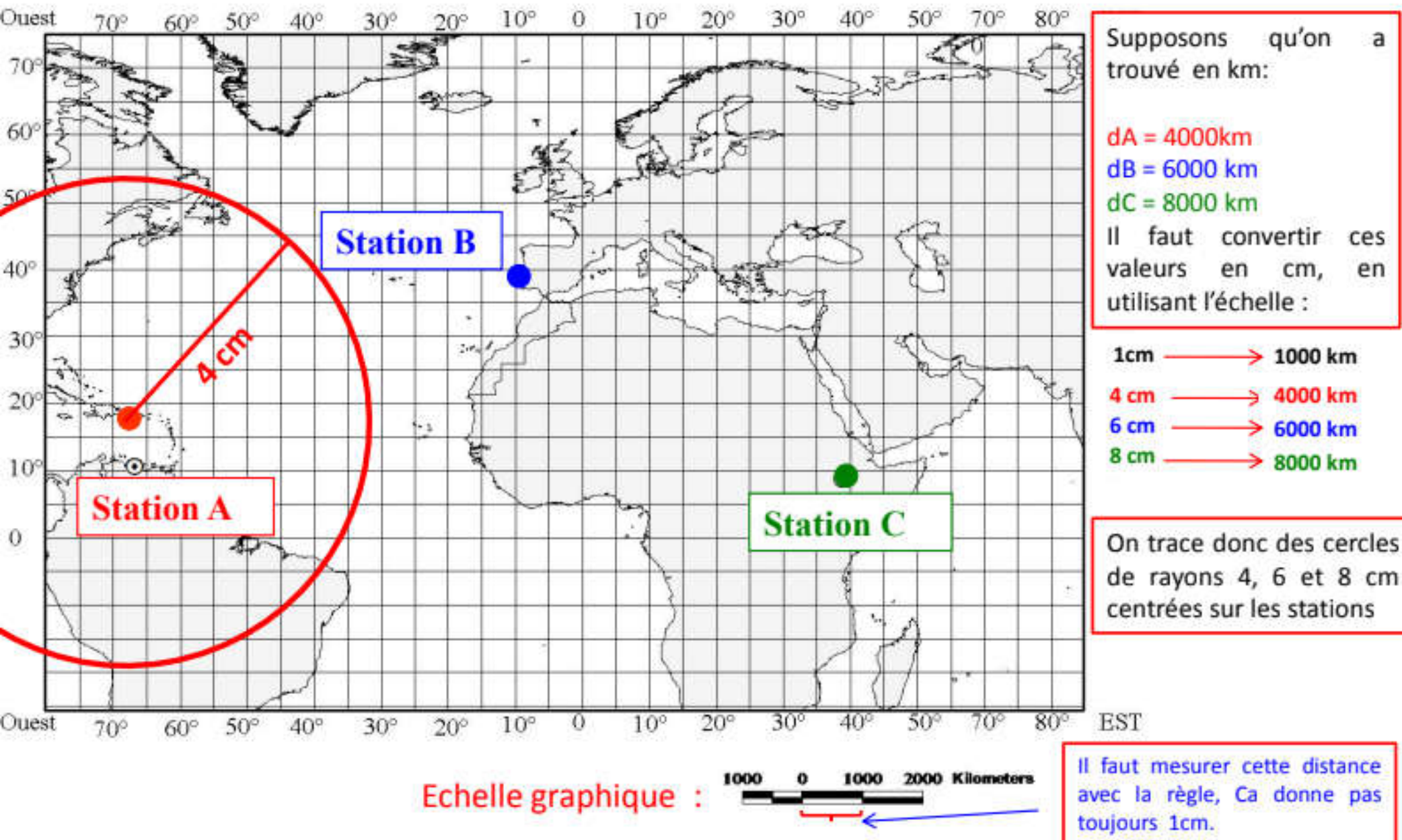
b – Localisation de l'épicentre d'un séisme

Une fois que les distances épicentrales des trois stations **A**, **B** et **C** sont connues (en Km = Distance réelle) , on commence à tracer sur la carte géographique de la zone d'étude et où sont localisées les positions des trois stations **A**, **B** et **C** 3 cercles de centres respectifs **A**, **B** et **C** et les rayons respectifs **dA**, **dB** et **dC**. (en cm = distance de la carte).

NB: avant de tracer les cercles, il faut convertir les valeurs des distances épicentrales (en km) en distances cartographiques (en cm). Pour ce faire, on doit utiliser l'échelle graphique de la carte. (Voir TP de cartographie).

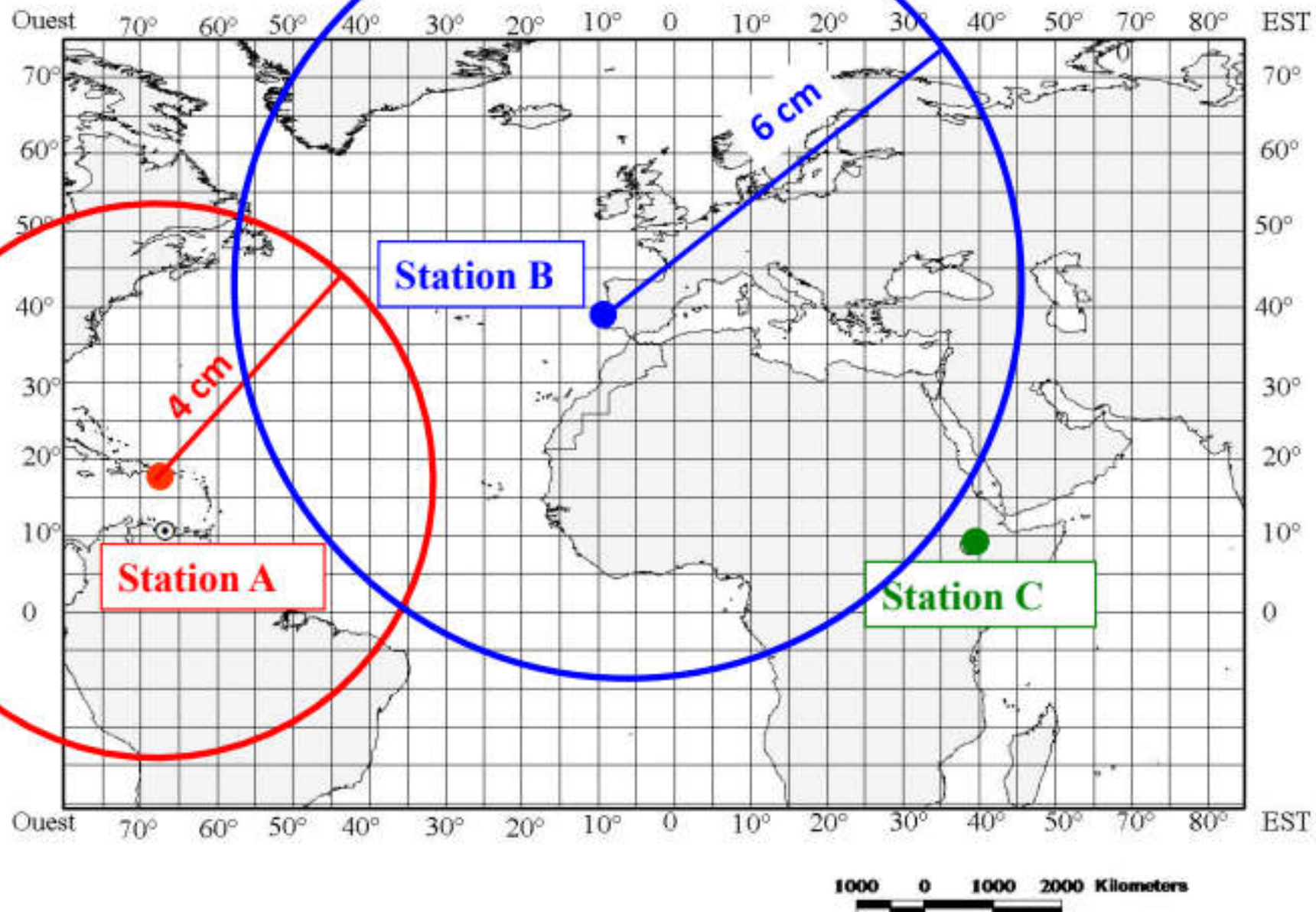
5. Etude instrumentale des séismes

b – Localisation de l'épicentre d'un séisme



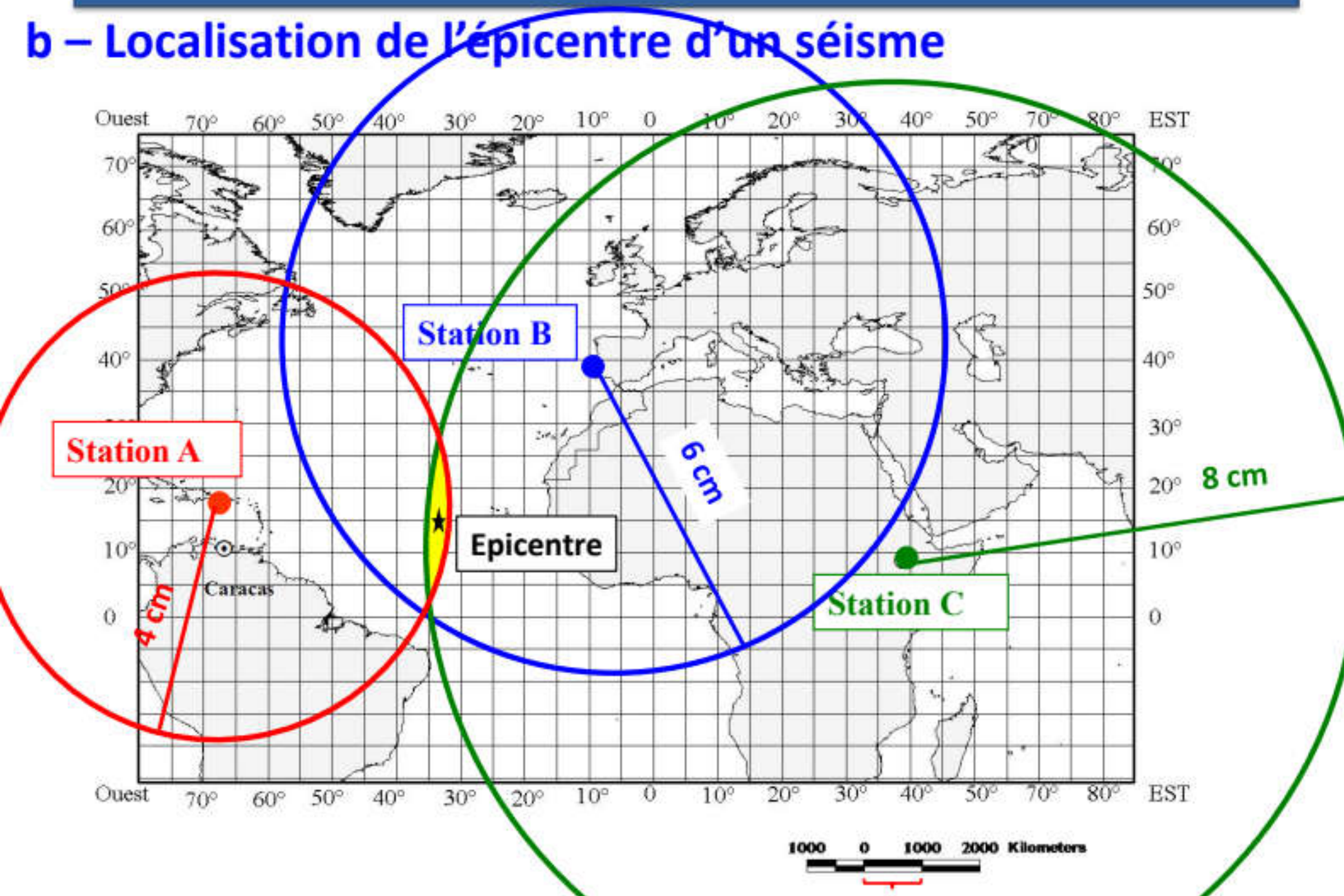
5. Etude instrumentale des séismes

b – Localisation de l'épicentre d'un séisme



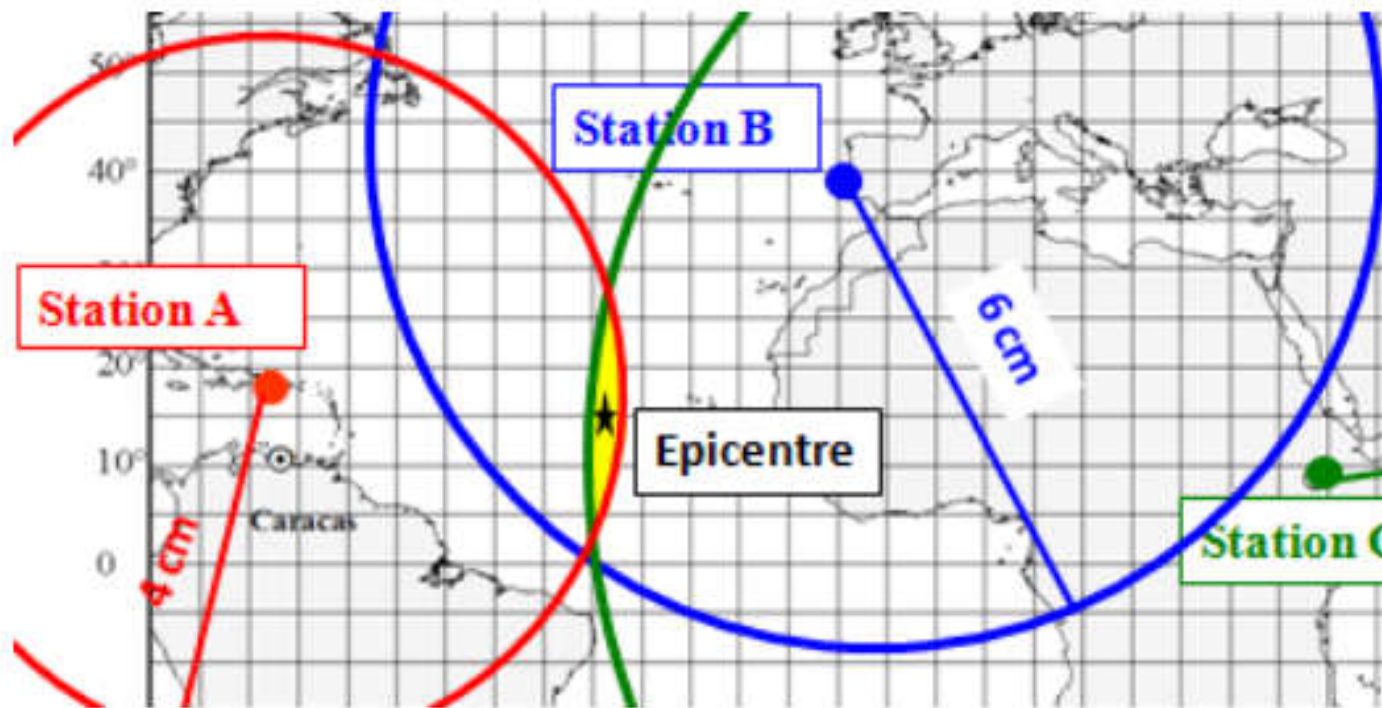
5. Etude instrumentale des séismes

b – Localisation de l'épicentre d'un séisme



5. Etude instrumentale des séismes

b – Localisation de l'épicentre d'un séisme



L'épicentre recherché se trouve à l'intersection des 3 cercles dont les centres respectifs A, B et C et les rayons respectifs d_A , d_B , d_C . Dans la pratique cette intersection est rarement un point; c'est généralement une surface dont le barycentre est adopté comme épicentre. La position de l'épicentre n'est connue qu'à quelques km près.

Exercice 5 :

Ce même séisme (Al Hoceima 1994, de l'exercice 1) a été enregistré par trois stations marocaines :Palomas(**PAL**) ; Touzarine(**TOU**) et Tazeka(**TZK**). La profondeur du foyer est de 13 km. Les temps d'arrivée des ondes P et des ondes S sont comme-suit :

Pour la station PAL : Tp est 08h 26mn 55,5s. L'arrivée des ondes S a lieu à 08h26mn57,5s.

Pour la station TZK : L'arrivée des ondes P a lieu à 08h 27mn 14,5s et celle des ondes S à 08h 27mn 30s ;

Pour la station TOU :Les ondes P sont arrivées à 08h 27mn 0,5s, celle des ondes S à 08h 27mn 5,5s.

Le tableau 1, (**table de Jeffreys-Bullen**) représente la variation des différences des temps d'arrivés (**Ts –Tp**) en fonction de la distance épacentrale **D**

1. Déterminez la distance épacentrale pour les trois stations PAL, TZK et TOU ?
2. A quelle heure s'est produit le séisme ? Sachant que la vitesse de propagation des ondes P dans profondeurs situées entre 5 et 15 km est de l'ordre de **6,0 Km/s**.

- 3-** Localiser sur **la figure 2** l'épicentre du séisme, donnez sa position géographique en X et Y ?.
- 4.** Comparer l'épicentre du séisme avec celui déterminé par les courbes d'isoséistes (épicentre macrosismique) de l'exercice 1 ?

Ts – Tp (en s)	D en km	Ts – Tp	D	Ts – Tp	D
0,0	00,0	6,5	55,6	14,3	122
0,6	05,6	7,2	61,6	15,0	128
1,3	11,1	7,8	66,7	15,5	131
2,0	16,7	8,4	72,3	16,4	139
3,2	27,8	9,1	77,8	17,7	150
3,9	33,4	9,8	83,4	19	161
4,6	38,9	10,4	89,0	20,4	172
5,0	44,5	11,7	100	25,6	217
5,8	50,0	13,6	117	28,8	245

Tableau 1 : table de Jeffreys-Bullen :

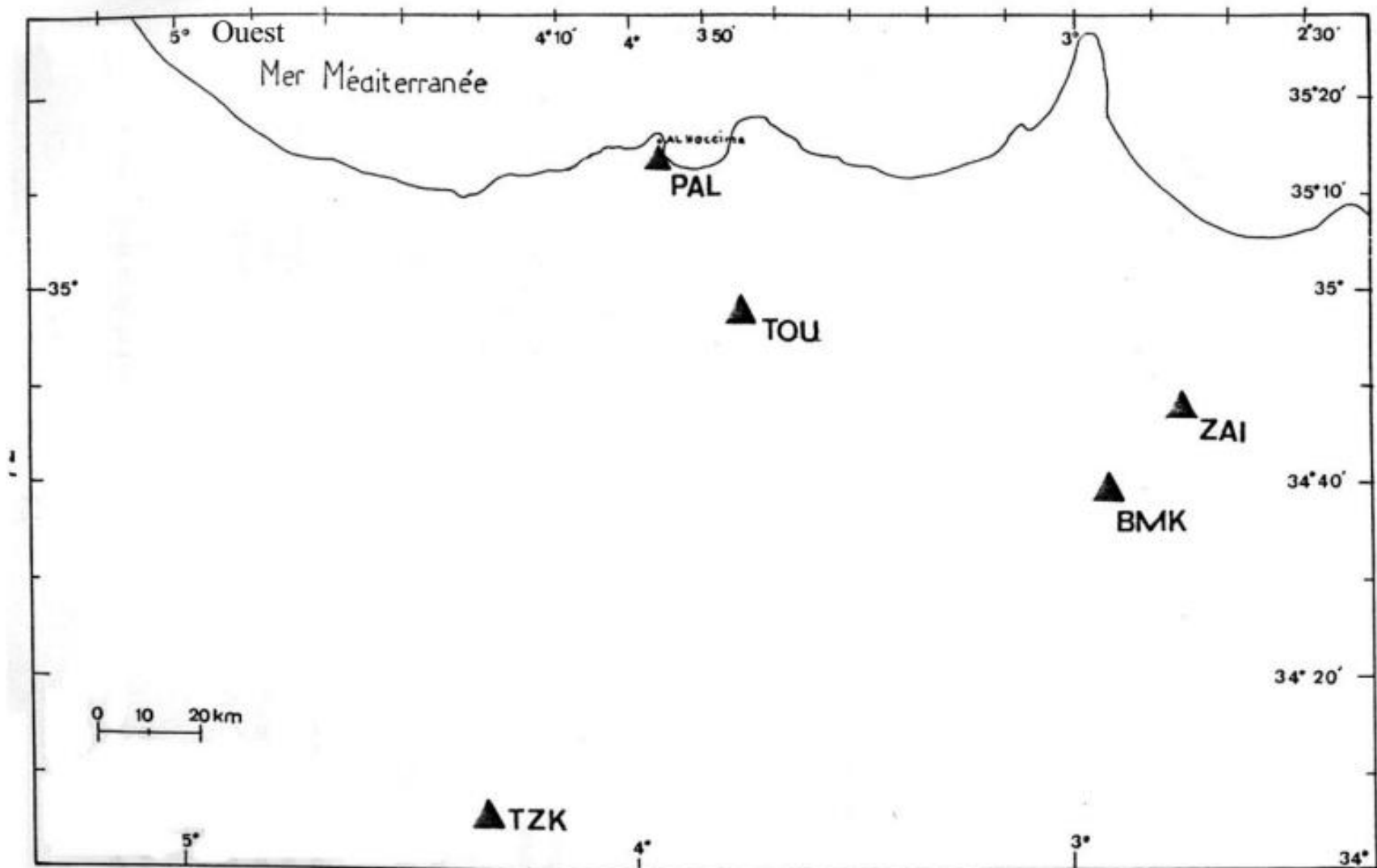


Figure 3

Solution de l'exercice 5

1. Pour déterminer la distance épicentrale pour les trois stations on doit d'abord calculer les différences des temps d'arrives des ondes S et P pour chacune des trois stations, puis on cherche sur la **table de Jeffreys-Bullen**, les distances épicentrales correspondantes .

PAL: $TS - TP = 08h26mn57,5s - 08h 26mn 55,5s = 2s$

TZK : $TS - TP = 08h 27mn 30s - 08h 27mn 14,5s = 15.5 s$

TOU : $TP - TP = 08h 27mn 5,5s - 08h 27mn 0,5s = 5s$

Donc à partir de la table:

D (PAL) = 16.7 Km

D (TZK) = 131 Km

D(TOU) = 44.5 km

2. A quelle heure s'est produit le séisme ? Sachant que la vitesse de propagation des ondes P dans profondeurs situées entre 5 et 15 km est de l'ordre de **6,0 Km/s**.

Pour calculer le temps d'origine T_0 (à l'épicentre) du séisme

D'après l'énoncé de l'exercice, le séisme a une profondeur de 13 km ; donc les ondes P vont se propager avec une vitesse de **6,0 Km/s**.

D'autre part :

$V_p = D / (t_p - t_0)$ donc;

$$T_0 = T_p - D/V_p$$

On peut donc calculer t_0 en choisissant les données de n'importe quelle station, si on prend par exemple la station PAL, on aura :

$$T_0 = 08\text{h } 26\text{mn } 55,5\text{s} - 16.7 / 6$$

$$T_0 = 08\text{h } 26\text{mn } 55,5\text{s} - 2.78 = \underline{\underline{08\text{h } 26\text{mn } 52,7\text{s}}}$$

3- Localiser sur **la figure 2** l'épicentre du séisme, donnez sa position géographique en X et Y ?.

1,6 cm à 20 km : (NB mesurez l'échelle sur la figure de l'exercice)

$$X \underline{\hspace{2cm}} D(\text{PAL}) = 16.7 \text{ Km}, \quad D \text{ en cm de PAL} = (16.7 \times 1,6) / 20 = 1.33 \text{ cm}$$

$$X \underline{\hspace{2cm}} D(\text{TZK}) = 131 \text{ Km}, \quad D \text{ en cm de TZKL} = (131 \times 1,6) / 20 = 10.48 \text{ cm}$$

$$X \underline{\hspace{2cm}} D(\text{TOU}) = 44.5 \text{ km}, \quad D \text{ en cm de TOU} = (44.5 \times 1,6) / 20 = 3.56 \text{ cm}$$

Attention : Il faut calculer les distances en fonction des mesures que vs avez sur votre figure (il se peut qu'il y a une légère différence avec ces corrections à cause des variations d'échelle d'impression).

