L'enregistrement au quotidien des secousses telluriques régionales et lointaines par les réseaux sismologiques permet d'accumuler de nombreuses données qui font l'objet d'études variées : localisation de l'épicentre d'un séisme, calcul de sa magnitude, estimation de la vitesse de propagation des ondes, etc.

QUESTION DE RECHERCHE

- **Comment, à partir de sismogrammes, déterminer les différents paramètres d'un tremblement de terre : coordonnées de l'épicentre, temps d'origine, magnitude, vitesse de propagation des ondes ?**

ACTIVITÉS PROPOSÉES

Sismo Vitesse 46

Identifier l'onde P et l'onde S sur un sismogramme. Calculer la vitesse de propagation de ces ondes à partir de leur temps d'arrivée.

Sismo Épicentre 48

À partir de l'étude des sismogrammes, localiser l'épicentre d'un séisme proche en utilisant la méthode des cercles et la méthode des médiatrices.

Sismo Heure 50

À partir de l'analyse des enregistrements de plusieurs stations, construire et exploiter les hodochrones de l'onde P et de l'onde S pour un séisme donné.

Sismo Signal 52

À partir du mouvement du sol enregistré en continu par une station, extraire la donnée permettant de reconstituer le sismogramme d'un événement sismique local ou mondial.

Sismo Manteau 54

À partir de l'étude des sismogrammes, évaluer la vitesse moyenne des ondes de volume parcourant des zones profondes du globe.

SISMO VITESSE

THÈME
Données.

OBJECTIF
Calculer la vitesse à laquelle se propage une onde sismique.

MOTS-CLÉS
Ondes sismiques, vitesse.

CHAMPS DISCIPLINAIRES
Géosciences, Mathématiques, Sciences Physiques.

DÉROULEMENT
Les ondes sismiques naissent au niveau du foyer (zone de rupture située en profondeur) puis se propagent dans toutes les directions. Le point qui se trouve en surface, à la verticale du foyer, est l'épicentre. Lors d'une secousse sismique, les géologues déterminent l'heure de l'événement et les coordonnées géographiques (latitude et longitude) de l'épicentre. Connaissant la localisation d'une station et l'heure d'arrivée des ondes sismiques à cette station, il est possible de déterminer la vitesse de propagation des ondes sismiques.

1re ÉTAPE

Discuter avec les élèves de la notion de vitesse, acquise en mathématiques.
Ex : déplacement d'un véhicule en km/h. Déterminer l'équation de la vitesse : v = D / t (la célérité de l'onde est considérée comme constante).
Rechercher dans le cadre de la propagation d'une onde sismique, quelle est la distance à connaître et le temps.
D = Distance épicentrale ; t = temps (temps mis par les ondes pour arriver à la station, c'est-à-dire heure d'arrivée à la station – heure de l'événement sismique).

2e ÉTAPE

L'activité peut s'organiser différemment selon que l'on dispose ou non d'un ordinateur.
- 1er cas : avec matériel informatique **(➤ document 1)**.
  Rechercher un événement sismique dans la banque de données sismologiques ➤ **site internet** : http://o3e.geoazur.eu
- 2e cas : sans ordinateur.
  Proposer un sismogramme préalablement sélectionné et imprimé depuis la banque de données.

3e ÉTAPE

On travaillera à partir du sismogramme et de la carte régionale **(➤ documents 2 et 3)**.
Calculer la vitesse.
Pour connaître la distance épicentrale, il faut :
- retrouver les coordonnées (longitude/latitude) de l'épicentre ;
- retrouver les coordonnées (longitude/latitude) de la station.

Pour connaître le temps, il faut :
- retrouver l'heure de l'événement sismique ;
- déterminer l'heure d'arrivée des ondes à la station.

Un sismogramme présente un train d'ondes d'amplitude variable. Les premières qui arrivent à la station sont les ondes P. Il est possible de les pointer et de visualiser ainsi précisément l'heure d'arrivée des ondes à la station.
Les élèves disposent alors de l'ensemble des données indispensables au calcul de la vitesse en km/s. Dans le cas d'un séisme proche, la vitesse trouvée pour les ondes P correspond à leur vitesse dans la croûte terrestre superficielle.

NOTES, COMPLÉMENTS, EXTENSIONS

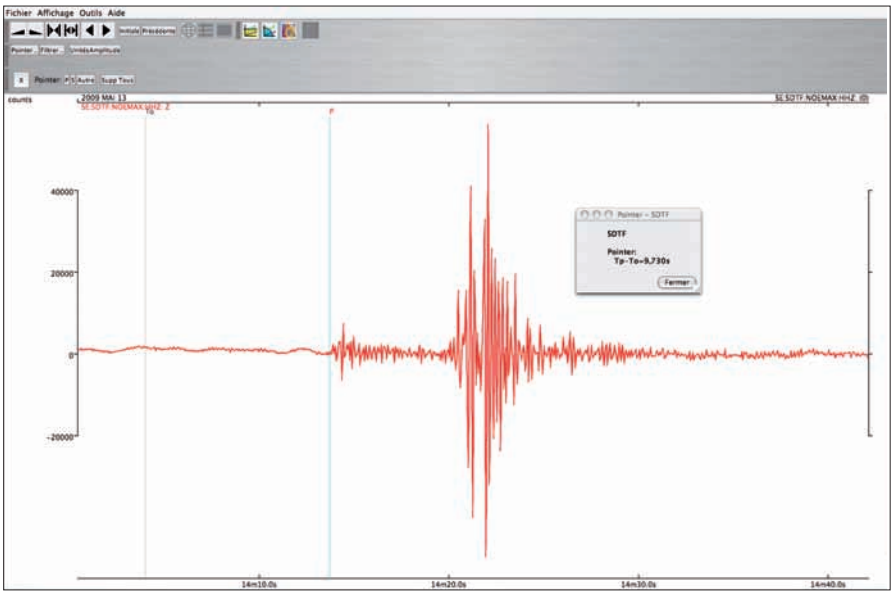
- Calculer la vitesse de propagation des ondes pour un séisme lointain, notamment un séisme localisé aux antipodes, donc ayant traversé le globe (ex. : téléséisme aux Îles Tonga le 19/03/2009).
- Comparer les résultats afin d'appréhender la structure interne du globe par le biais de la sismicité.

➤ DOCUMENT 1 Choisir un événement sismique à partir de la base de données de *O3E* (http://o3e.geoazur.eu)

- Cliquer sur les données sismologiques puis sur les sismogrammes sélectionnés par le réseau.
- Choisir l'année ex : 2009.
- Visualiser les sismogrammes sélectionnés.
- Choisir un séisme (ex. : mer ligure, 13/05/09 / station SDTF), la composante Z suffit.

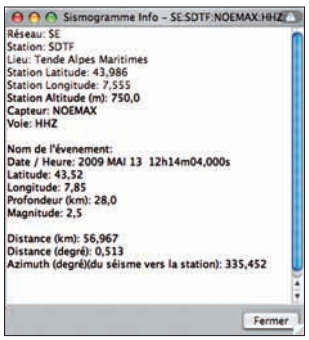
➤ DOCUMENT 2 Déterminer l'heure d'arrivée des ondes à la station

Pointer les ondes P (l'arrivée des ondes sismiques se distinguent bien du bruit de fond).
La lecture de l'heure se fait en bas de l'écran.
Dans notre exemple :
Tp = 12 h 14 m 13 s
soit, Tp - To = 9,73 s.



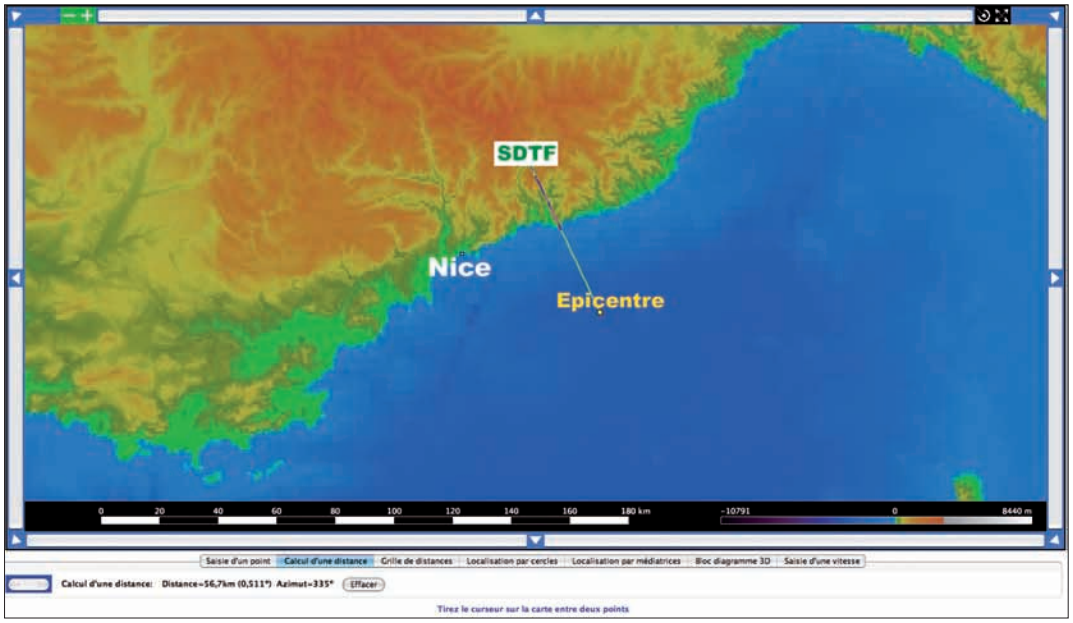
➤ DOCUMENT 3 Mesurer la distance épicentrale

Pour localiser l'épicentre et les stations, repérer les références à partir de la fenêtre "infos" de *SeisGram2K* (➤ annexe 2).



Heure d'origine du séisme	=	12 h 14 min 04 s
Longitude épicentre	=	43,52°
Latitude épicentre	=	7,85°
Profondeur du séisme	=	28 km

Utiliser la carte appropriée sur EduCarte, localiser repérer l'épicentre (onglet "saisie d'un point"), les stations. Évaluer la distance (onglet **Calcul d'une distance** et en déduire la vitesse de l'onde P dans la croûte terrestre.



Résultat du calcul : $v = D/t = \frac{57}{9,75} = 5,8$ km/s

SISMO ÉPICENTRE

THÈME
Données.

OBJECTIF
Localiser l'épicentre d'un séisme à partir de sismogrammes.

MOTS-CLÉS
Sismogramme, onde P, onde S, épicentre, hodochrone.

CHAMPS DISCIPLINAIRES
Géosciences, Mathématiques.

DÉROULEMENT
Les élèves exploitent les sismogrammes enregistrés par les stations du réseau pour localiser l'épicentre d'un séisme local ou régional.
On localisera l'épicentre soit par la "méthode des médiatrices" soit par la "méthode des cercles".

1re ÉTAPE

Sélectionner un séisme local ou régional dans la banque de données du site internet http://o3e.geoazur.eu
Il faut sélectionner un séisme local ou régional enregistré par plusieurs stations du réseau (trois stations sont suffisantes).
On peut d'ailleurs s'interroger avec les élèves, sur le nombre de stations sismiques nécessaires pour localiser avec précision l'épicentre d'un séisme.
Pour chaque station, il faut pouvoir distinguer sur l'enregistrement, les ondes P et les ondes S **(➤ document 1)**.

2e ÉTAPE

Localiser l'épicentre par la technique des médiatrices.
Les élèves vont pointer le temps d'arrivée des ondes P, et classer les stations en fonction de leur distance à l'épicentre recherché.
Ils peuvent aussi opérer ce classement en comparant les amplitudes des sismogrammes enregistrés à chaque station.
La localisation de l'épicentre consiste à tracer entre chaque couple de stations étudiées une médiatrice et d'exclure, comme zone épicentrale possible, le territoire englobant la station la plus distante du séisme.
On peut réaliser cette cartographie par médiatrice à l'aide d'*EduCarte* (> onglet localisation par médiatrices), accessible depuis *SeisGram 2K* **(➤ document 3)**.

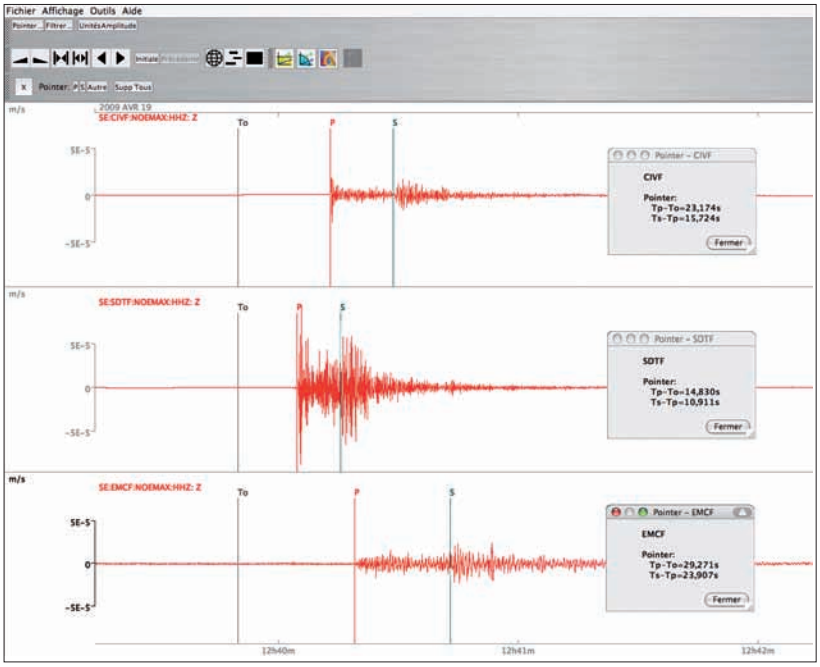
3e ÉTAPE

Les élèves peuvent déterminer sur les sismogrammes (1re étape) l'heure d'arrivée des ondes P et S puis le délai Ts-Tp.
A l'aide de l'hodochrone, ils en déduisent la distance à l'épicentre de chaque station **(➤ document 2)**.
A partir d'*EduCarte* (> onglet localisation par cercles), il suffit de tracer pour chaque station un cercle dont le rayon correspond à la distance épicentrale **(➤ document 3)**.
L'épicentre est le point à l'intersection des différents cercles tracés.

NOTES, COMPLÉMENTS, EXTENSIONS
Mettre en relation les failles actives des Alpes latines avec une cartographie des épicentres locaux.

➤ DOCUMENT 1

On choisit d'étudier un événement bien enregistré sur plusieurs stations du réseau (ex. : Italie du Nord - 19/04/09).
On choisit de superposer les sismogrammes enregistrés par les stations du réseau.
On pointe, à l'aide de la souris les ondes P et S pour déterminer le délai Ts - Tp



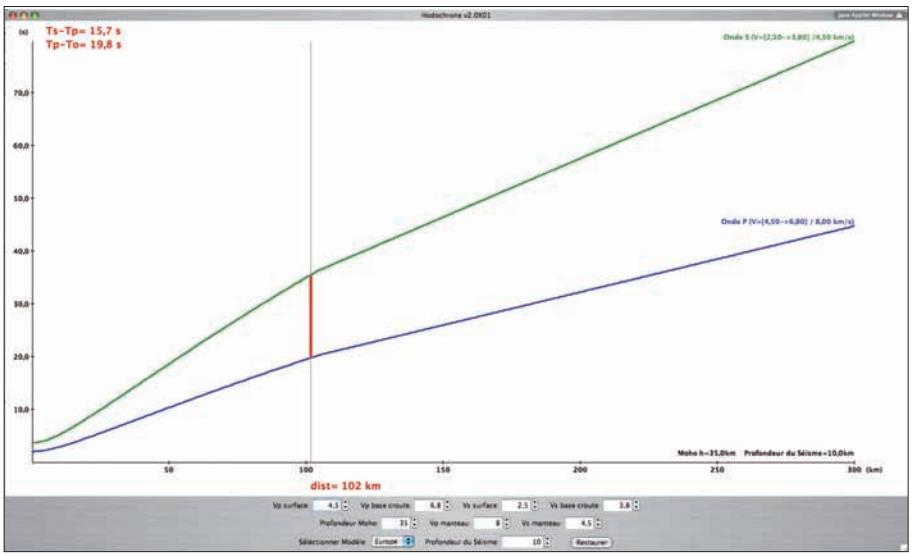
Exemple avec séisme local :
19 avril 2009, Italie du Nord.

➤ DOCUMENT 2

Utiliser un hodochrone.

Le délais Ts - Tp est converti en distance.

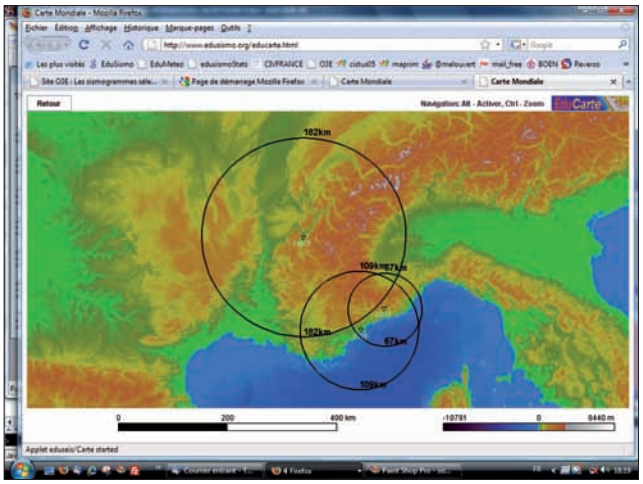
Accès à l'hodochrone :



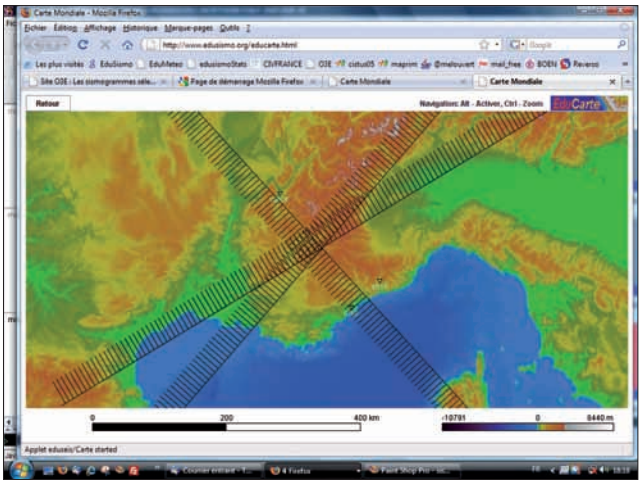
➤ DOCUMENT 3

Utiliser la carte du site *Sismos à l'École*.

Localisation par la méthode des cercles



Localisation par la méthode des médiatrices



SISMO HEURE

THÈME
Données.

OBJECTIFS
Construire et exploiter les hodochrones de l'onde P et de l'onde S, pour un séisme donné.

MOTS-CLÉS
Sismogramme, hodochrone, onde P, onde S.

CHAMPS DISCIPLINAIRES
Géosciences, Mathématiques.

DÉROULEMENT
L'intérêt de la démarche est le suivant : à partir des seuls tracés sismographiques et de la localisation de l'épicentre, sans hypothèse de départ, on va montrer que la vitesse de propagation des ondes sismiques est constante dans la croûte terrestre, que l'onde P et l'onde S partent du foyer au même temps d'origine. Ce temps d'origine sera estimé sans connaître les vitesses de propagation, qu'on déterminera également.

1R ÉTAPE

Sélectionner un séisme local ou régional pour lequel on dispose des enregistrements significatifs de 4 stations au moins. Les stations sélectionnées ne doivent pas être situées à la même distance de l'épicentre.

➤ **site internet** : http://o3e.geoazur.eu

2E ÉTAPE

Pour chacun des tracés, à l'aide d'un logiciel d'analyse sismologique (dans notre cas, *SeisGram 2K*) ou sur papier, les élèves repèrent et pointent l'onde P et l'onde S, puis déterminent les temps d'arrivée correspondants (➤ **document 1)**.

3E ÉTAPE

Il s'agit de la construction des hodochrones. Les élèves réalisent un graphique montrant les temps d'arrivée des ondes P et S, en fonction de la distance station-épicentre, pour chaque station (➤ **document 2)**.

MATÉRIEL ➤ papier millimétré ou tableur.

4E ÉTAPE

Les élèves sont invités à analyser les courbes obtenues et à en retirer le maximum d'informations sur le temps d'origine et sur la vitesse de propagation des ondes sismiques dans la croûte terrestre. Ils comparent ensuite leurs résultats avec les données fournies par les centres de recherche.
On montre aussi que la célérité des ondes peut être considérée comme constante (➤ **document 3)**.

NOTES, COMPLÉMENTS, EXTENSIONS

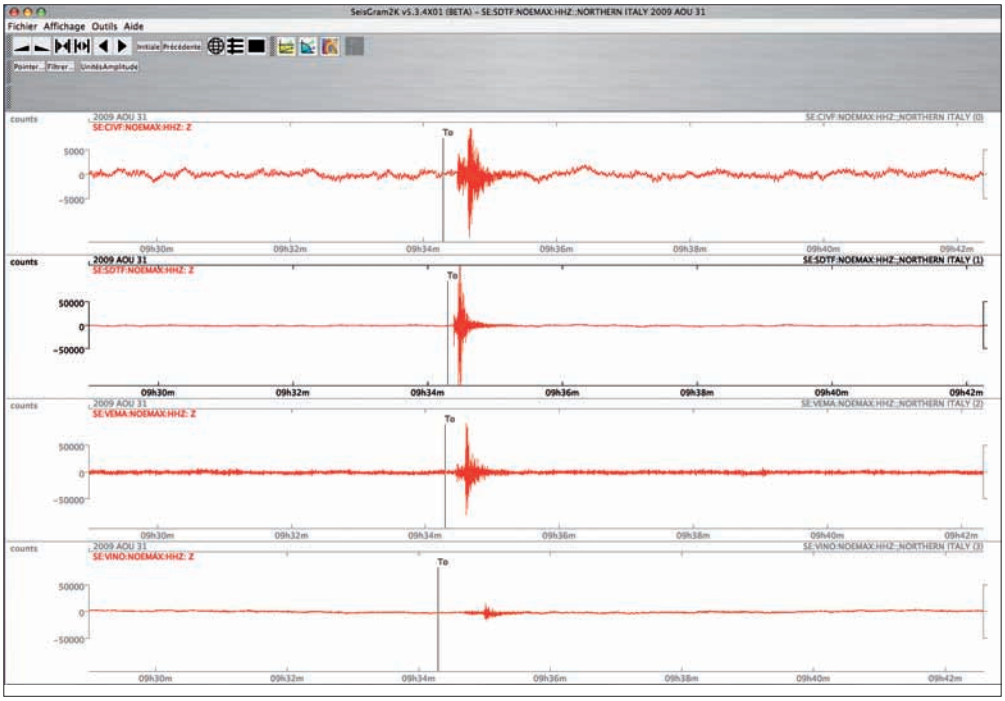
- Recherche d'autres séismes pouvant faire l'objet d'une telle étude et comparaison des vitesses de propagation obtenues dans une même région.
- Calcul d'erreur et d'incertitude sur les résultats.

➤ DOCUMENT 1

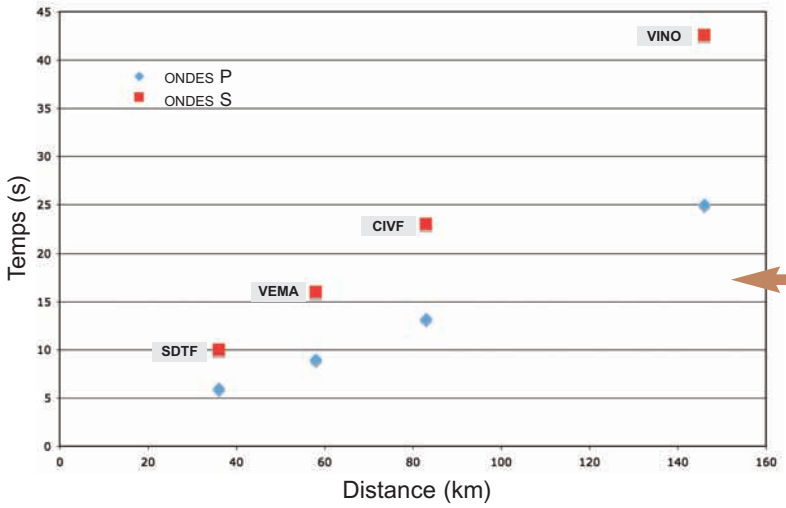
Prenons comme exemple le séisme du 31 août 2009 en Italie du Nord

Epicentre
Latitude : 44,35
Longitude : 7,45

Nous disposons des enregistrements de 4 stations du réseau :
SDTF,
VEMA,
CIVF,
VINO



➤ DOCUMENT 2



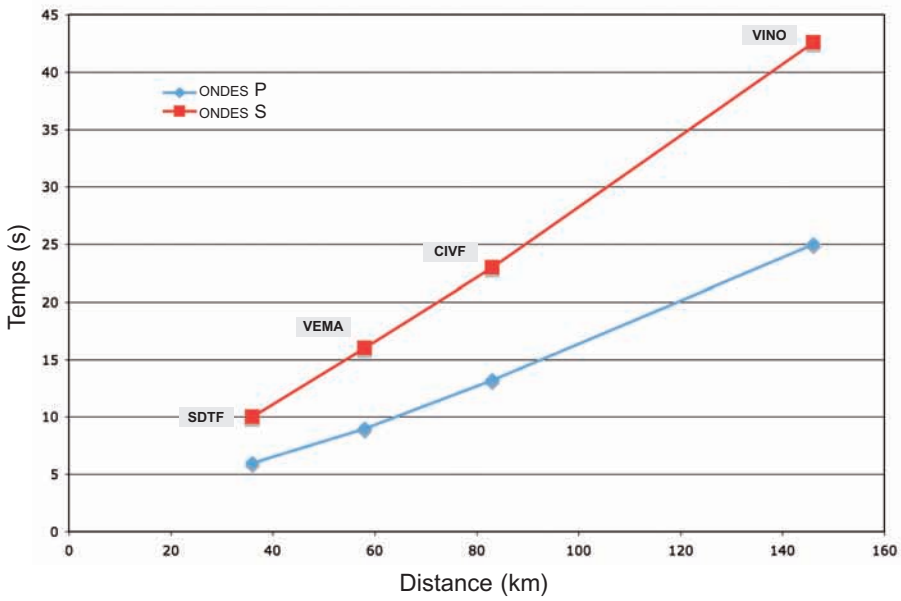
On place, à l'aide d'un tableur, les temps d'arrivée des ondes P et S sur un unique graphique, pour chacune des stations. En connaissant les coordonnées de l'épicentre ainsi que celles de chaque station, on peut calculer cette distance. On peut aussi la trouver dans le module "informations" du logiciel *SeisGram 2K*.

STATION	DIST. en km	T(P) en s	T(S) en s
SDTF	36	6,0	10,0
VEMA	58	9,0	16,0
CIVF	83	13,2	23,0
VINO	146	25,0	42,6

➤ DOCUMENT 3

Conclusions :

- Les points correspondant à l'onde P sont alignés, les points correspondant à l'onde S également : la vitesse des ondes sismiques dans la croûte est constante.
- Les droites coupent l'axe d = 0 km en un point correspondant au temps origine : 09 h 34 min 17,4 s.
- La vitesse de l'onde P est égale à l'inverse de la pente : Vp = 5.7 km/s. De même Vs = 3.4 km/s.



SISMO SIGNAL

THÈME
Données.

OBJECTIFS
À partir du mouvement du sol enregistré en continu par une station, extraire la donnée permettant de reconstituer le sismogramme d'un événement sismique local ou mondial, ou aussi de récupérer le signal d'une expérience en classe.

MOTS-CLÉS
Ondes sismiques,
mouvement du sol, fréquence.

CHAMPS DISCIPLINAIRES
Géosciences,
Sciences Physiques.

DÉROULEMENT
Les stations d'acquisition sismologique à but éducatif enregistrent en continu le mouvement du sol.
Ce mouvement (vitesse du sol) est synchronisé au temps universel grâce à une horloge pilotée par GPS (➤ sismo station).
On peut donc avoir accès à la donnée brute qui se présente sous forme de fichiers numériques contenant les données du mouvement du sol sur une durée de temps courte de l'ordre de deux minutes.
On peut donc extraire directement de cette station ces données pour reconstruire un tracé relatif à un événement sismique naturel ou expérimental.

1R ÉTAPE

Visiter une station d'enregistrement (➤ sismo station).
Visualiser le tracé du mouvement du sol en direct à l'écran de contrôle de la station et vérifier la bonne synchronisation de la machine avec le capteur GPS. On peut, par hasard, assister à l'arrivée d'ondes sismiques d'un événement local faible ou lointain.Les stations sont accessibles par internet depuis le site *O3E* (carte de localisation de stations, cliquer sur la station de son choix), (➤ document 1).

➤ site internet : http://o3e.geoazur.eu

2E ÉTAPE

L'activité peut s'organiser ainsi :
les élèves identifient, à l'aide du site internet, un événement sismique qui aurait pu être enregistré par la station visitée (compte tenu de l'éloignement et de la magnitude de ce séisme). Cette opération se fait à partir du module > Banque de données > Sismologie > Sismicité récente.
Les élèves évaluent alors l'heure d'arrivée des ondes relatives à ce séisme (d'où un travail sur la vitesse des ondes, leur parcours dans le globe) puis se connectent sur la station de leur choix et procèdent à une extraction manuelle de la donnée (➤ document 2).

3E ÉTAPE

À l'aide du logiciel *SeisGram 2K* (➤ annexe 2), ouvrir les fichiers sélectionnés, télécharger le fichier au format ".sac" ainsi reconstitué sur l'ordinateur. Les élèves peuvent donc récupérer un sismogramme d'un événement très récent (➤ document 3).

NOTES, COMPLÉMENTS, EXTENSIONS

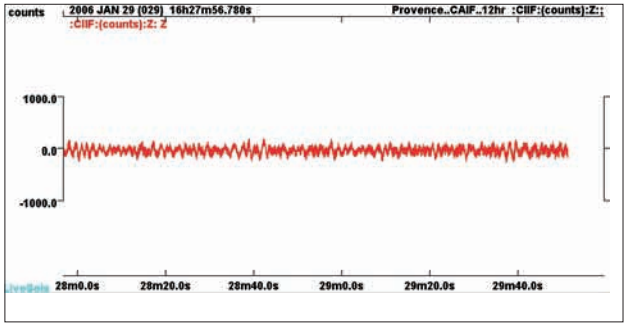
- On peut utiliser cette activité pour enregistrer les bruits liés à l'activité humaine à proximité du sismomètre.
- On peut évaluer la qualité du site en comparant plusieurs stations.

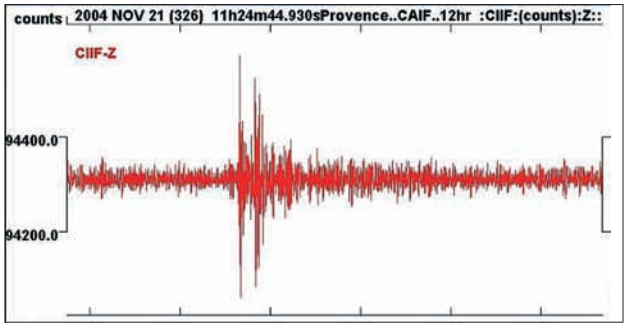
➤ DOCUMENT 1 Visualiser le mouvement du sol en continu sur l'écran de contrôle

Capteur GPS

Sismomètre

Mouvement du sol en continu à l'écran

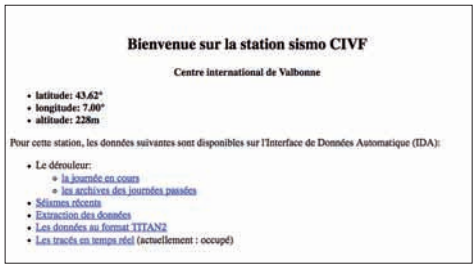




➤ DOCUMENT 2 Recherche d'un événement et requête manuelle des données

Module > Nom de la station.

Des élèves, en séjour au ski, ressentent une secousse. De retour au collège, ils entreprennent d'extraire le mouvement du sol. Ils recherchent, au préalable, les références de ce séisme.



Bienvenue sur la station sismo CIVF

Centre international de Valbonne

- latitude: 43.62°
- longitude: 7.00°
- altitude: 228m

Pour cette station, les données suivantes sont disponibles sur l'Interface de Données Automatique (IDA):

- Le déroulé:
  - la journée en cours
  - les archives des journées passées
- Séismes récents
- Extraction des données
- Les données au format TITAN2
- Les tracés en temps réel (actuellement : occupé)

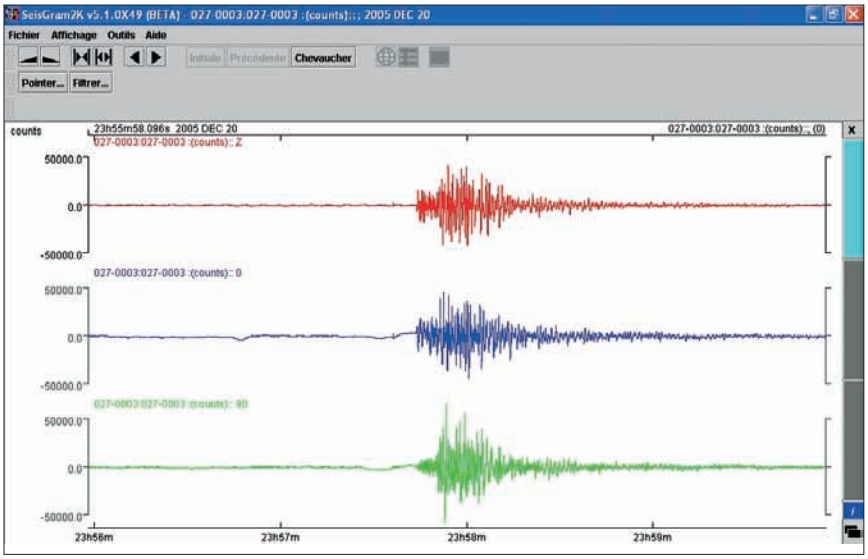
Sélection des données

Retour au menu principal

Début de l'enregistrement (année/mois/jour-heure:minute) : 2009 / 09 / 18 - 12 : 15
durée (en seconde, une heure au maximum) : 300 valider

identificateur	requête	état
EVT168	2009.09.18-08.51,2009.09.18-08.56	en cours de traitement

➤ DOCUMENT 3 Résultat de l'extraction manuelle



SISMO MANTEAU

THÈME
Données.

OBJECTIF
Confronter des données enregistrées avec la structure des zones profondes du globe.

MOTS-CLÉS
Sismogramme, ondes de volume, structure du globe, modèle de la Terre.

CHAMPS DISCIPLINAIRES
Géosciences,
Sciences Physiques,
Mathématiques.

DÉROULEMENT
On considère une station sismologique. Cette station enregistre des séismes tantôt proches tantôt lointains voire très lointains. On va comparer les sismogrammes de ces différents séismes enregistrés à la même station. De leur étude, on devrait pouvoir montrer que les ondes de volume, traversant des zones plus ou moins profondes du globe, ont une vitesse moyenne variable.

1R ÉTAPE

Repérez, dans la base de données sismologiques (sismogrammes enregistrés par les observatoires) plusieurs séismes enregistrés à la même station. Faire une sélection d'événements, qui comprend des séismes distants de quelques kms à d'autres très lointains (➤ exemples ci-contre).
On peut alors représenter sur un croquis, à l'échelle, le trajet suivi par les ondes directes en représentant une coupe de terre à l'échelle, en plaçant le foyer, la station et le trajet des ondes de volume.
En première approximation, le trajet des ondes peut être représenté par la corde du cercle dont l'angle est égal à la distance épicentrale.
La longueur d'une corde sous-tendue par un angle α est égale à $2r\sin(\alpha / 2)$.

➤ **site internet** : http://o3e.geoazur.eu

2E ÉTAPE

Pour chaque sismogramme sélectionné, on repère l'arrivée des premières ondes sismiques. On pointe les temps d'arrivée des ondes P directes et on en déduit la vitesse moyenne des ondes P directes dans chaque cas (➤ **document 1**).
On constate que la vitesse moyenne des ondes directes varie avec la distance parcourue. On pose alors le problème de savoir ce qui influence la vitesse des ondes sismiques.

➤ **site internet** : http://o3e.geoazur.eu

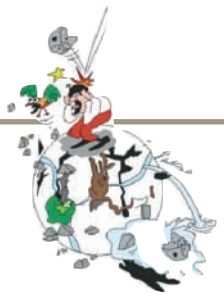
3E ÉTAPE

En utilisant le bouton "phases théoriques" dans *SeisGram 2K*, on peut afficher les temps d'arrivée théoriques des ondes de volume P, PP (ondes P réfléchies sur la surface terrestre).
On repère le temps d'arrivée des ondes PP sur les sismogrammes, il ne reste plus qu'à évaluer leur trajet (en utilisant le croquis de la première partie). On peut alors évaluer leur vitesse moyenne.
La comparaison des vitesses moyennes des ondes directes P et réfléchies PP montre l'importance du matériau traversé sur la vitesse des ondes de volume. Le trajet des rais sismiques est donné par le bouton "rais sismiques".

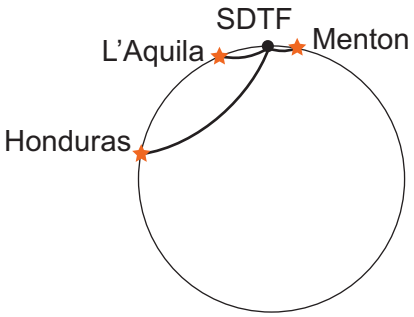
➤ **site internet** : http://o3e.geoazur.eu

NOTES, COMPLÉMENTS, EXTENSIONS

- Mettre en relation ces résultats avec d'autres exemples avec des séismes ayant traversé le noyau terrestre (séisme venant des antipodes).
- Modéliser à l'aide de cellules piézo-électriques le lien entre nature des matériaux et vitesse des ondes sismiques (➤ **sismo piezo**).

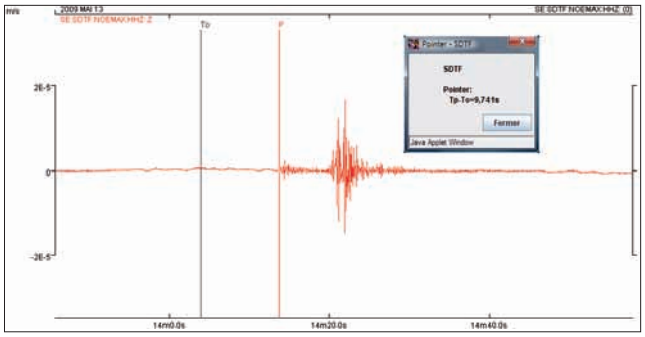


DOCUMENT 1 Des sources sismiques plus ou moins lointaines

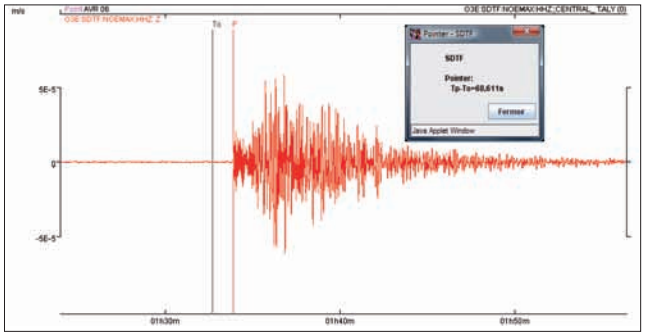


Sélection des événements dans base de données
> séismes sélectionnées par le réseau en 2009
Station choisie : SDTF
Evènements choisis dans les données sismologiques :
14 mai 2009 – Menton – To= 12h14m04,000s - distance = 0,5 deg
6 avril 2009 – L'Aquila – To = 01h32m41,400s – distance = 5 deg
28 mai 2009 – Honduras – To= 08h24m44,000s - distance = 81 deg

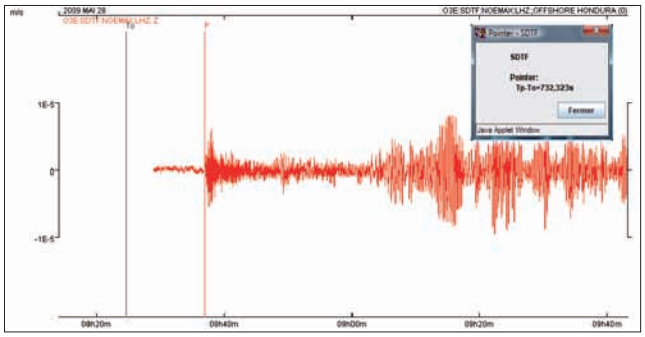
DOCUMENT 2 Des vitesses d'ondes de volume variables



Tp-To = 9,7 s / distance = 0,5 deg soit 56 km
>> vitesse = 56 / 9,7 = 5,77 km/s

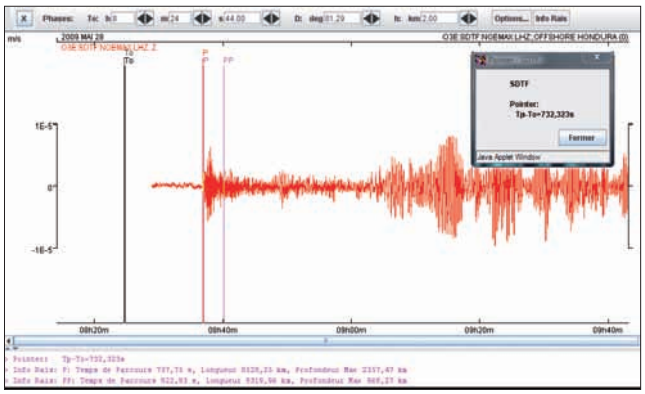


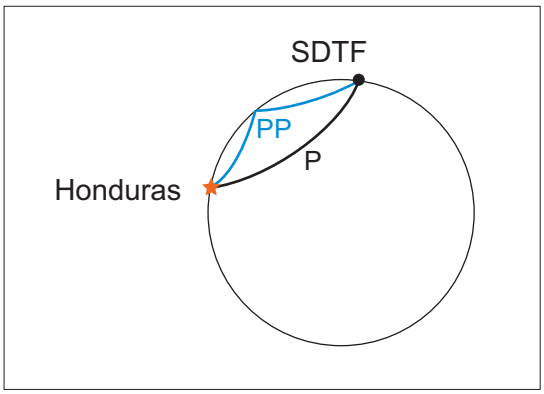
Tp-To = 68,6 s / distance = 5 deg soit 556 km
>> vitesse = 556 / 68,6 = 8,10 km/s

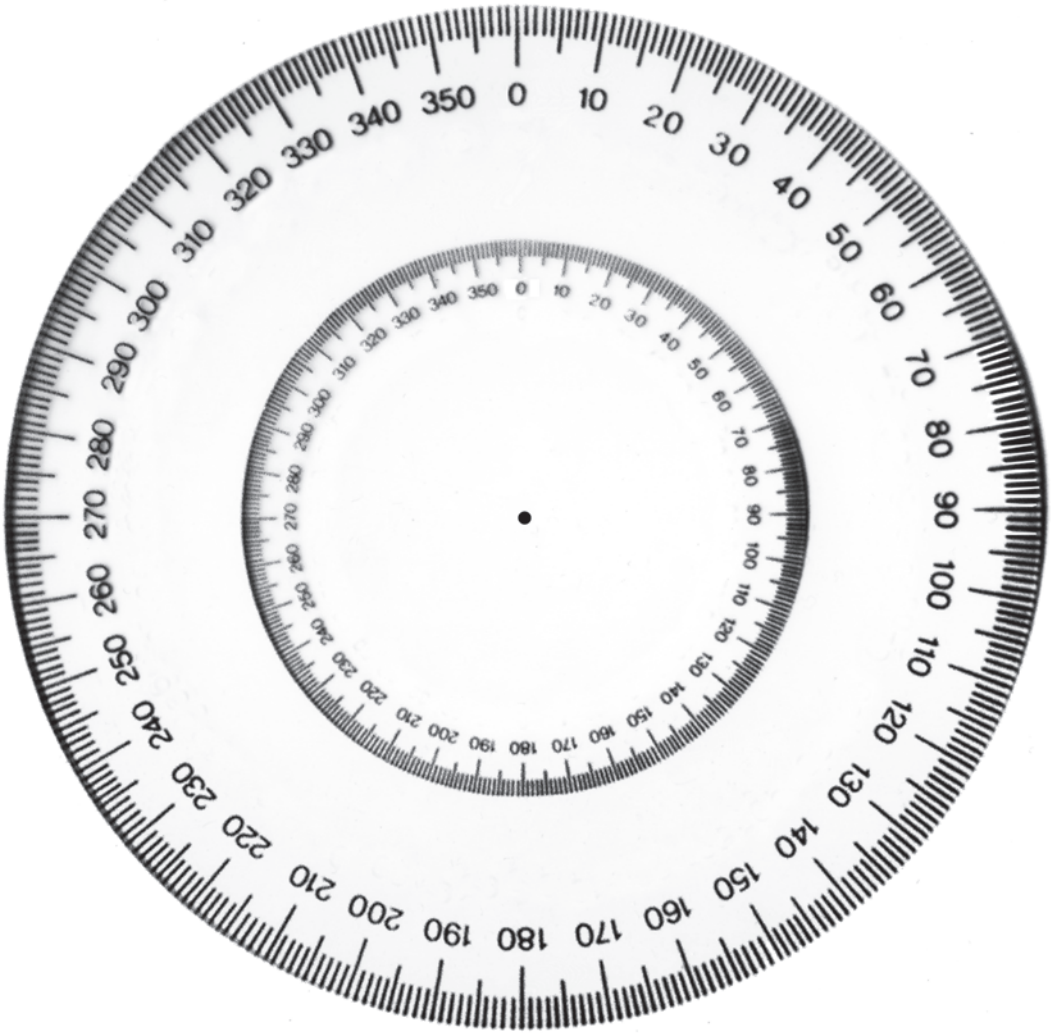


Tp-To = 732,3 s / distance = 81 deg
soit 8284 km
>> vitesse = 8284 / 732,3 = 11,31 km/s

DOCUMENT 3 Mise en relation vitesse des ondes et zones profondes du globe





> Pointer : Tp-To=732,323s
> Info Rais : P : Temps de Parcours 737,75 s, Longueur 8528,25 km, Profondeur Max 2357,47 km
>> vitesse : 8528,25 / 737,75 = 11,56 km/s
> Info Rais : PP : Temps de Parcours 922,93 s, Longueur 9319,96 km, Profondeur Max 968,27 km
>> vitesse : 9319,96 / 922,93 = 10,09 km/s

➤ DOCUMENT 4 **Modèle pour constructions géométriques dans l'étude de la structure du globe terrestre**