

Les laboratoires de Physique du Globe de la Sorbonne, en Martinique et Guadeloupe, assurent l'observation continue des phénomènes sismologiques très fréquents sur la chaîne des Petites Antilles.

A sept kilomètres, à vol d'oiseau, face au volcan de la Montagne Pelée, sur le sommet du Morne des Cadets, vers 510 mètres d'altitude, est installé un des plus sensibles seismographes du monde.

L'origine de cette installation, faite en 1920, remonte à la destruction de la ville de Saint-Pierre Martinique et à la mort subite de ses 28.000 habitants, causée par une nuée ardente le 8 mai 1902 au cours d'une éruption du volcan Montagne Pelée.

Alors que le poids du pendule d'un appareil courant varie de 0.5 à 1.4 tonne, celui de Martinique pèse vingt tonnes et amplifie mécaniquement les trois composantes des vibrations du sol. La sensibilité de ces appareils, croissant avec le carré de leur masse, est, paraît-il, suffisante dans ce dernier cas, pour assurer l'enregistrement du "choc des vagues" contre l'île; d'autant plus que dans les amplificateurs mécaniques il faut des masses élevées pour l'enregistrement des ~~graves~~ vibrations des ~~grandes~~ longues d'ondes.

Remarquons que, dans le ~~même~~ <sup>ce</sup> laboratoire, un montage électrique atteint le même degré de sensibilité. Il s'agit d'un pendule de 1.200 grammes monté avec un condensateur variable et dont une composante des oscillations reçues est ~~amplifiée~~ amplifiée en haute fréquence.

Au cours d'une visite, un récent séisme, sensible aux habitants mais non destructeur, orientait notre curiosité vers l'enregistrement des fortes secousses; mais dans ce cas le stylet inscripteur sort des limites de l'épure et l'enregistrement des tremblements violents se limite ~~marqué~~ aux premiers trains d'ondes, qui, en fait, servent seuls à déterminer la direction et l'origine du phénomène.

Intéressé alors par l'enregistrement des faibles amplitudes, ~~mais~~ ou microséisme, genre "choc des vagues", j'appris l'existence d'une abondante série d'études à ce sujet.

De 1874 à 1930 on constatait successivement:

- 1° Les petites oscillations enregistrées sont bien dues à des mouvements du sol et non aux vibrations du bâtiment protégeant l'appareil.
- 2° Les mêmes oscillations sont en concomitance remarquable avec les baisses

*Trajets de cyclones  
en octobre 1944*

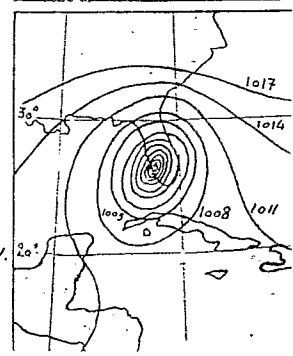
8 Bermudes



10	24 00	.....
11	12 00	.....
11	24 00	.....
12	12 00	.....
12	24 00	.....
13	12 00	.....
13	20 00	.....
14	04 30	.....
16	14 00	.....
5	01 30	.....
15	14 30	.....
16	04 30	.....
16	14 30	.....
11	07 30	.....
11	1 00	.....
13	07 30	.....
4	1 00	.....
19	00 00	.....
9	19 00	.....
20	05 30	.....
20	17 00	.....
21	12 00	.....
22	1 00	.....

*Typhénoregistrements microseismiques, par extraits de cinq minutes, pendant le Cyclone d'octobre 1944, à l'observatoire de Quantanamo (Cuba)*

*Isobares du Cyclone d'octobre entrant en Floride*



barométriques dues aux cyclones les plus voisins.

~~l'amplitude de ces oscillations sont en coïncidence remarquable avec le~~  
3° l'amplitude de ces oscillations est la même au fond d'un puits de mine  
( -300 m. ) qu'à la surface du sol.

Cette dernière constatation eut lieu en recherchant l'influence des mouvements de l'écorce terrestre sur le dégagement du grisou. On vérifia une liaison entre les microseismes et le dégagement du grisou, mais, en parallèle avec les baisses de pression barométrique ce qui confirmait, en particulier, la proposition n° 2.

De fait les progrès de la météorologie consacrerent la relation entre les microseismes et la présence de forts gradients barométriques. Le passage des typhons donna lieu aux premières vérifications aux ANTILLES, au JAPON, aux INDES et à MADAGASCAR de 1900 à 1908. En 1930 l'extension des cartes météorologiques permettait une vérification en Europe à l'institut de Physique du Globe de STRASBOURG.

Mais on précisait :

4° L'agitation microseismique cesse dès que la dépression barométrique, qui est l'origine, quitte la surface des mers pour devenir continentale.

5° Il y a une ressemblance étroite entre les mouvements microseismiques et les ondulations des trains de houle.

Ces résultats d'observation acquis on rechercha le mécanisme produisant, à partir des dépressions barométriques, les enregistrements, par les seismographes, d'ondes presque parfaitement sinusoïdales, d'amplitude régulièrement croissante et décroissante et de période comprise entre quatre et neuf secondes.

L'école Allemande s'attachait à considérer les trains d'ondes enregistrés comme résultat du choc des vagues contre les falaises. Mais le seismographe d'Heligoland décelait des courbes irrégulières de période variant de deux à quatre secondes sans mettre en évidence les types de courbes des stations moins franchement côtières. On corrigea cette hypothèse en supposant que le parcours continental rendait les vibrations sinusoïdales en augmentant la période avec la distance parcourue, mais cela fut contraire à l'observation.

L'école Anglaise considéra: "Il est très probable que l'agitation microseismique est constituée d'ondes de RAYLEIGH nées au fond de la mer sous l'action des vagues soulevées par le vent sur de larges étendues océaniques".

Les ondes de RAYLEIGHT se propagent à la surface d'un solide élastique. Cette surface étant supposée plane on peut avoir dans le solide des vibrations de forme elliptique, situées dans le plan vertical et s'amortissant exponentiellement en profondeur. L'école Anglaise démontra qu'à énergie égale, les ondes de RAYLEIGHT présentent une amplitude plus grande à la surface d'une couche sédimentaire molle recouvrant un sol granitique qu'à la surface d'un milieu granitique homogène, ce qui établit un mode de relation entre la géologie et les microséismes.

De plus les rapports des composantes horizontales et verticales de ces vibrations varie avec l'épaisseur de la couche sédimentaire et avec la période des ondulations.

Ces propositions sur la forme du phénomène sont vérifiées par l'expérience, mais la transmission proprement dite restait sous forme d'hypothèse relatives à la pression des vagues sur le fond de la mer, provoquant la vibration d'un fragment d'écorce terrestre; cette vibration se propageant indépendamment de la houle.

En France, l'Institut de Physique du Globe, s'est attaché à dépouiller, avant la guerre de 1939 les enregistrements de la composante verticale d'une "tempête microsismique" débutant brusquement afin d'être bien caractérisée. Il s'agissait de celle du 18 Octobre 1935 particulièrement favorable pour déterminer une vitesse de propagation. Le dépouillement sur dix stations Européennes mettait en évidence des variations rapides d'amplitude dont les retards, en fonction de la position géographique des sismogrammes, permettaient d'évaluer la vitesse moyenne de propagation de l'ébranlement à :  $1,9 \text{ km/sec}$ , pour des périodes de six à sept secondes.  $\bar{v} \pm 0,6 \text{ km/sec}$  près,

Mais cette vitesse varie localement dans de fortes proportions, et, de plus, ces ébranlements subissant une dispersion les ondulations sont suffisamment modifiées pour n'être plus identifiables après quelques kilomètres de parcours, sauf pour des formes très caractéristiques comme celle du 18.10.1935.

Connaissant la vitesse de propagation, et à partir des stations connues, on constate que l'origine de la perturbation coïncide avec le voisinage du centre d'une dépression cyclonique existant au moment considéré dans l'Atlantique Nord.

Par ailleurs la même étude montrait, en mettant en évidence

...en évidence une étroite corrélation entre les variations d'amplitude aux stations étudiées, que les trains d'ondes ne sont pas des vibrations stationnaires locales fonction du sous-sol. On est donc en présence d'ondes se déplaçant progressivement, et qui, pour une période déterminée ont une origine unique. Mais la suite du phénomène se complique régulièrement par l'apparition de perturbations météorologiques secondaires.

En deuxième partie l'I.P.G. de Paris a comparé l'agitation microseismique et les mouvements de la mer en analysant les microseismes à Strasbourg et la houle au Maroc, dont les côtes reçoivent la "houle libre", provenant du nord de l'anticyclone des Açores, sans être généralement dans les zones dépressionnaires.

Compte tenu de la précision des observations, un maximum d'amplitude de l'agitation microseismique à Strasbourg précède un maximum de force de la houle sur la côte du Maroc, d'un temps proportionnel à la distance de cette côte au centre de la dépression cyclonique relevé sur les cartes météorologiques au moment du maximum de l'agitation. Ainsi :

date du max. d'agitation	retard du max. de la houle	position de la dépression cyclonique
21.1.1934.	3 jours	Nord de l'Islande
27.9.1927.	2,5 "	Islande
11.1.1930.	2 "	entre Ecosse et Islande
19.3.1934.	1,5 "	au large de l'Islande
7.12.1932.	1 "	au large de la Corogne
10.12.1932.	0,5 "	Portugal
13.1.1926.	0. "	au large du Maroc

Si l'agitation microseismique à Strasbourg était liée au "choix des vagues" sur la côte Européenne, la différence de temps, entre le maximum des microseismes à Strasbourg et le maximum de la houle au Maroc, serait proportionnelle à la différence des parcours marins, puisque la célérité des vibrations dans le sol est cent fois supérieure à celle de la houle. Selon la position de la dépression perturbatrice dans l'Atlantique cette différence pourrait alors avoir des valeurs positives, négatives ou nulles; or, les microseismes de Strasbourg sont toujours en avance, par conséquent uniquement liés à la vibration originelle du centre dépressionnaire.

Ces mêmes observations précisent les vitesses de propagation la houle Atlantique sans être d'ailleurs en accord parfait avec la loi de Gerstner  $v \text{ m/sec.} = \frac{g T}{2\pi \text{ sec.}}$

Période moyenne en secondes :	7.7	12	16.5
Vitesse observé en K/h (Kunly):	53	57.6	71.5
Vitesse calculée en K/h :	43.3	67.4	95.5

De même l'on constate que le rapport des amplitudes de l'agitation microseismique et de la houle varie dans le même sens que le rapport des distances du centre dépressionnaire à Strasbourg et aux cotes marocaines. Mais on doit tenir compte de la trajectoire et de la vitesse du centre dépressionnaire car il se produit un effet analogue à l'effet Doppler pour le son:

Lorsque la dépression s'éloigne du Maroc la période de la houle est relativement trop forte; elle est relativement trop faible lorsque la dépression se rapproche.

Enfin la période de l'agitation microseismique est du même ordre que celle de la houle considérée au large, c'est à dire identique à la période caractéristique de l'agitation originelle, car près des cotes il y a modification de cette période de houle et, en définitive, le choc des vagues n'est pas la cause des microseismes. La cause mécanique probable est dans l'interférence de trains d'ondes de houle et en particulier par la formation en un point précis, pendant un temps déterminé, d'un "ventre de vibration" dont CHARCOT nous donne une description :

"On sait que si le centre d'un cyclone passe sur un navire, le calme est parfois si complet qu'une bougie tient allumée sur le pont;... La mer devient très grosse, formée de houles aux directions différentes, devient effroyable: c'est un monstrueux clapotis sans direction déterminée et les vagues se dressent pyramidales dans un désordre terrifiant... Ce calme central, normal dans les cyclones des régions tropicales, n'existe pour ainsi dire pas dans les dépressions de l'Atlantique Nord. Les vagues pyramidales se montrent ce pendant au point critique et nous avons pu en prendre de belles photographies."

Les vagues pyramidales sont causées d'une variation de pression, d'une atmosphère pour dix mètres d'eau, bien supérieure aux quelques millimètres de mercure correspondant aux variations barométriques. Au fond de la mer le sol prendra un mouvement oscillatoire propre qui se propagera avec une célérité fonction de la période et des conditions géologiques, avec pour origine : en premier lieu le centre dépressionnaire et en second lieu les "clapotis" de houles sur des hauts fonds ou sur le talus continental.

On distingue donc le choc des vagues résultant du phénomène de houle et le microseisme d'origine cyclonique. Ces deux formes de vibrations

...Vibrations du sol sont enregistrées; mais la première s'amortit très vite tandis que la seconde porte très loin et peut être utilisée pour la prévision des déplacements de cyclone.

Les statistiques des variations annuelles de l'agitation micro-séismique traduisent l'activité cyclonique moyenne d'une vaste région. Mais cette activité de 1920 à 1935 présente une variation périodique telle, que l'on peut ~~affirmer~~ affirmer que la fréquence et l'intensité des cyclones sont sous la dépendance des variations unidécennales de l'activité solaire.

Cette activité est définie par les "nombres de WOLF" publiés par l'observatoire de Zurich.

Le soleil est en effet caractérisé par un nombre ou plutôt par deux :

a/ Les Anglais utilisent le rapport entre la surface totale des taches solaires et la ~~leur~~ millionième partie de la surface totale ~~du~~ du disque Solaire.

b/ Le centre de Zurich calcule le "nombre de WOLF" d'après la combinaison suivante:

$$S = K ( 10 g + f )$$

g : nombre de groupes de taches solaires

f : nombre de taches

~~Le coefficient de correction de la fonction d'ajustement~~

k : coefficient d'ajustement voisin de un, fonction des observateurs et des instruments.

s est compris entre 0 et 150.

Ce "nombre de WOLF" est calculé depuis 1749; la corrélation entre les résultats des deux méthodes est excellente.

A titre indicatif voici le tableau des nombres de WOLF correspondant aux maxima et minima d'activité solaire de période 11,2 ans.

Années	1902,1	1906,2	1913,7	1917,3
nombre de WOLF s=	2,6	64,2	1,5	105,4

Années	1923,7	1928,4	1933,9	1937,4	1944,2
nombre de WOLF	5,6	78,1	3,3	119,2	7,7

La diminution d'activité des taches solaires correspond à un accroissement de l'activité cyclonique. De plus des variations semi-annuelles présentent en moyenne leur maximum en fin décembre et fin juin sur toute la terre, peu après les 6 juin et 7 décembre époques où la terre traverse le plan de l'équateur solaire. Enfin une période de 27 jours, correspondant à la rotation moyenne du soleil accuse des maxima périodiques.

Ces derniers résultats statistiques apportent une contribution à la question complexe des influences de l'activité solaire sur la météorologie terrestre.

Au cours de la dernière guerre les services météorologiques des Etats-Unis et en particulier celui de la prévision des cyclones fut très gêné par la suppression totale de ses sources de renseignement maritime, du fait de l'interdiction des émissions de radio des bateaux à la mer et de la circulation des navires marchands en convois.

Recevoir un cyclone sans avertissement augmente sérieusement les risques. Les Américains reconsidèrent alors les travaux spéculatifs ~~des~~ Européens dont nous venons de souligner quelques traits.

Auparavant, durant le deuxième semestre de 1938, l'Université de Saint-Louis au Missouri, recherchait les meilleurs sismographes utilisables pour l'étude de la corrélation entre microséismes et cyclones, ainsi que la possibilité d'obtenir la direction du microséisme et son origine. Le cyclone de septembre sur la côte Est fut suivi en avion et au sismographe.

C'est en 1944 que l'on construisit une station spécialisée à Guantanamo bay (Cuba). Il s'agit de trois sismographes Galitzine, à amplification ~~en~~ <sup>magnétique</sup> ~~de~~ <sup>de</sup> la composante verticale des vibrations du sol. Ces appareils sont installés dans des caves sismiques disposées au sommet d'un triangle dont la longueur des côtés est de l'ordre de deux kilomètres et dont le sous-sol présente le maximum d'homogénéité; mais les secousses sont ~~comparables~~ transmises à un enregistreur et les trains d'ondes sont comparables sur la même bande en fonction du temps. Lorsque qu'un train d'ondes microseismiques atteint un sommet du triangle de la station, les temps nécessaires pour atteindre les deux autres déterminent la direction de l'onde perturbatrice.

La difficulté de l'étude pratique réside dans le choix d'une onde



...onde caractéristique et dans son identification au cours de son passage dans chacune des deux autres stations.

Car il existe un phénomène de dispersion. Un train d'ondes étant constitué par plusieurs ondes de périodes voisines il en résulte des vitesses de propagation légèrement différentes et un battement.

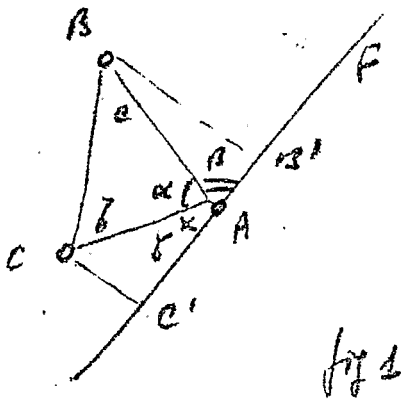
La même onde, à identifier sur trois enregistrements, se place d'une façon variable dans les "trains" étudiés et se déforme au cours de sa propagation.

On distingue, en général, dans un train d'ondes :

La vitesse de groupe ou célérité du train d'ondes

La vitesse de phase ou célérité d'une onde prise isolément.

L'onde observée entre les trois sismographes peut déterminer la position de son "front" et par conséquent la direction de l'épicentre, en mesurant les temps que met l'onde pour parcourir des distances définies.



Soit : A, B et C les trois appareils de la station 1 ( fig.1 )

Nous supposons que le front F du train

d'ondes touche d'abord la station en A. Soit T (BB') et T (CC') les temps unit par l'onde pour parcourir BB' et CC'.

(1)  $BB' = c \sin \beta = V \cdot T (BB')$

(2)  $CC' = b \sin \gamma = V \cdot T (CC')$

Soit :

(3) 
$$\frac{\sin \beta}{\sin \gamma} = \frac{b}{c} \times \frac{T (BB')}{T (CC')}$$

Le second membre de (3) est une constante puisque tous ses éléments sont connus ou mesurés.

(3) devient : 
$$\frac{\sin \beta}{\sin \gamma} = K$$

par construction  $\gamma = \pi - (\alpha + \beta)$

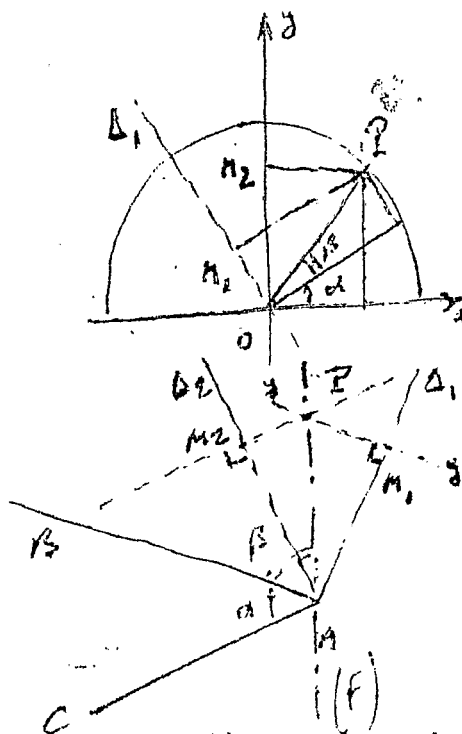
$$\gamma = \pi - (\alpha + \beta)$$

soit : 
$$\frac{\sin \beta}{\sin (\alpha + \beta)} = K$$

soit d'où l'on calcule l'angle  $\beta$  qui détermine le front F et par suite l'épicentre.

Construction graphique

Les éléments graphiques se construisent d'après la remarque suivante:



OM 1 et OM 2 sur la figure (2) sont respectivement  $\sin \alpha$  et  $\sin (\alpha + \beta)$ . et les perpendiculaires M 1 P et M 2 P à  $\Delta_1$  et O Y se coupent en P sur le cercle trigonométrique que  $\Delta_1$  et O Y sont perpendiculaires en O aux côtés de l'angle  $\alpha$  et O P définit l'angle  $\beta$ .

D'où la construction suivante :

Éléments graphiques connus :

Droites A B et A C définissant l'angle  $\alpha$

Éléments graphiques à construire :

- $\Delta_1$  perpendiculaire à A B en A .
- $\Delta_2$  perpendiculaire à A C en A .
- M2 point quelconque sur  $\Delta_2$
- x'x perpendiculaire à  $\Delta_2$  en M2 .

Éléments graphiques à pointer : M1 tel que  $\frac{AM1}{AMP} = K$

Éléments graphiques à tracer

Y'Y perpendiculaire à  $\Delta_1$  en M1 et coupant x'x en P .

A P définissant l'angle  $\beta$ .

( $\beta = \widehat{A B, A P}$ ) et le front du train d'ondes.

La direction de l'épicentre est perpendiculaire à : A P . L'épicentre se trouve dans le demi plan ne contenant pas B et C .

Les résultats de 1944 incitèrent les U.S.A. à établir en 1945 deux stations complémentaires, l'une à San-Juan, Roosevelt roads, (Porto-Rico) l'autre à Raymond (Floride), afin de déterminer avec plusieurs directions la région d'origine séisme et de la suivre avec plus de précision. Les installations furent prêtes l'1945 avant la saison des cyclones, et, depuis, il existe pour les grandes et la Floride un réseau capable par ses prévisions de réduire les pertes matérielles et surtout humaines.

Les cyclones en Amérique centrale ont lieu pendant l'hivernage et les dates extrêmes, dans l'année, vont du 10 Juillet au 21 Octobre. Depuis l'an 1494, les premières installations des Espagnols à St Domingue, on compte cinq à dix ouragans par an, catastrophiques pour une des Iles au moins.

En Martinique, depuis 1723, les 22 cyclones enregistrés furent particulièrement fréquents pendant la première quinzaine de Septembre.

