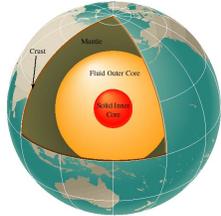


Le noyau de la terre: I- Introduction



Barbara Romanowicz - Cours 2011
-Chaire de Physique de l'Intérieur de la Terre
Collège de France
10 Octobre 2011

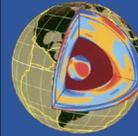


COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Année académique 2011-2012

CHAIRE DE PHYSIQUE DE L'INTÉRIEUR DE LA TERRE

Mme Barbara ROMANOWICZ, Professeur



Structure, composition and dynamics of the earth's
outer and inner core

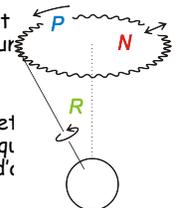
Colloque en anglais, organisé avec James Badro
le vendredi 25 novembre 2011, de 9 heures à 18 heures

Le noyau: un peu d'histoire...

- **1906** - Découverte du noyau liquide par Oldham
- **1936** - Découverte de la graine par Inge Lehmann
- **1940** - Birch suggère que la graine est solide et correspond à la solidification du fer
- **1950-51** - Bullen suggère que si la graine est solide on devrait observer des ondes du type PKJKP
- **1970** - Confirmation de la solidité de la graine par la mesure de fréquences de modes propres (*Dziewonski et Gilbert*)
- **1986** - Découverte de l'anisotropie sismique de la graine

19e siècle: L'intérieur de la terre: fluide ou solide?

– Forme de la terre: Aplatissement suggère une figure d'équilibre d'une rotation



– Hopkins (1793-1866): nutations et de la terre observées astronomiques impliquent une enveloppe solide d' \approx 1000 km d'épaisseur

– Kelvin (1824-1907) estime une épaisseur de 2000-2500km pour l'enveloppe solide

- Densité moyenne de la terre $\rho = 5.515 \text{ kg/m}^3$
- Densité des roches en surface $\sim 2.6 \text{ kg/m}^3$ (granite)

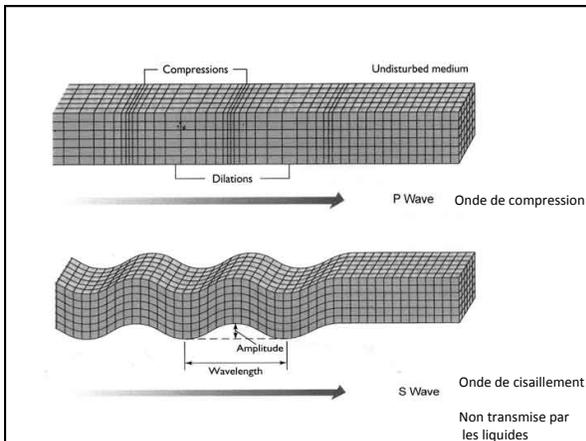
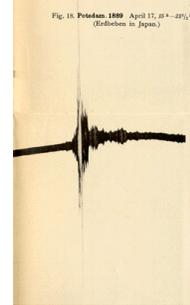
- => densité augmente avec la profondeur
- => La terre ne peut être entièrement composée de roches
- $I=0.33Ma^2$, inférieur à celui d'une sphère homogène ($I=0.40Ma^2$)

- Emil Wiechert (1896) suggère que la terre est comme un météorite géant avec un noyau de fer-nickel

- Sans s'aider de la sismologie, on peut faire des modèles à deux couches contraints par la masse totale de la terre (M) et son moment d'inertie (I)

• Sismologie globale née en 1889:

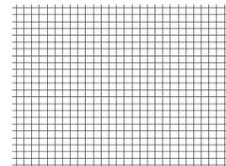
Ernst Von Reuber Pachwitz identifie un séisme au Japon enregistré à Potsdam sur un instrument basse fréquence destiné à la mesure des marées.



Vitesse des ondes élastiques de compression (P):

$$v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

K = module de compressibilité
 ρ = densité
 μ = module de cisaillement

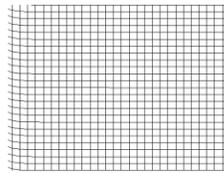


λ, μ , paramètres de Lamé

Vitesse des ondes élastiques de cisaillement (S):

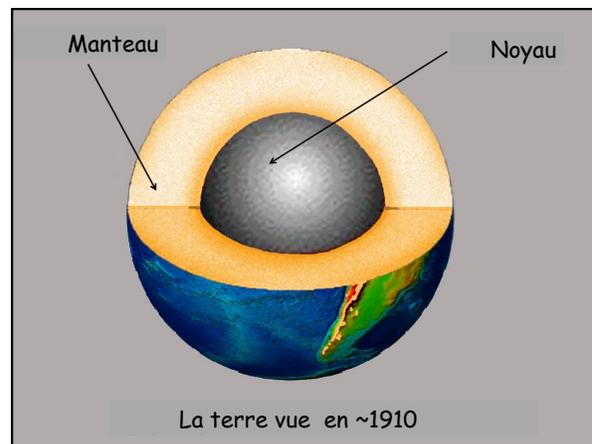
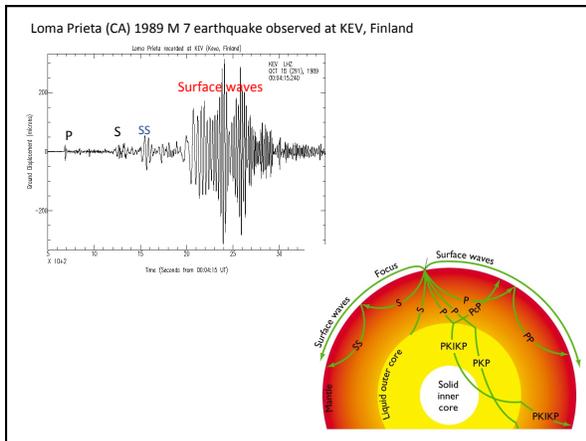
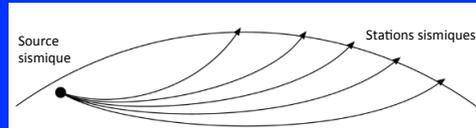
$$v_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

$$v_S < v_P$$



Mouvement de particules est perpendiculaire à la direction de propagation

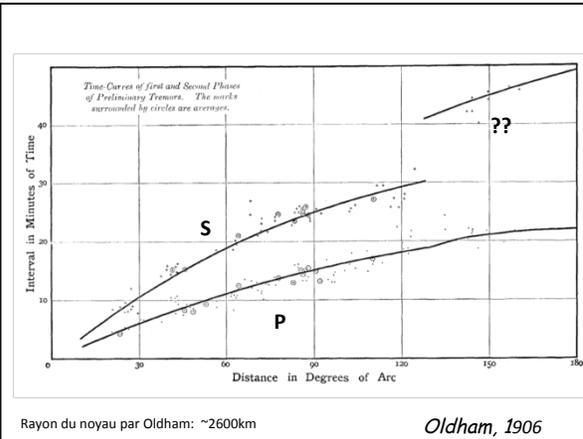
Trajets des rais sismiques lorsque la vitesse de propagation augmente avec la profondeur



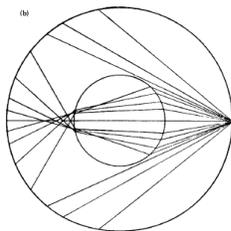


Preuve de l'existence du noyau:
Oldham (1906)

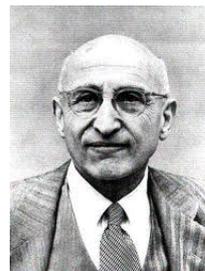
Richard Oldham 1858-1936
Premier directeur du service géologique des Indes



Trajets des ondes dans la terre vus par Oldham (1906)



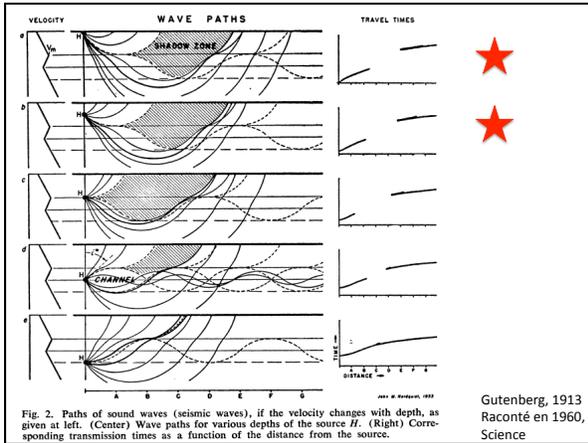
"There remain two important questions to be answered, namely the size of the core and the rate of transmission of the waves in it. As regards the size of the core, we have seen that it is not penetrated by the wave-paths which emerge at 120°; and the great decrease at 150° shows that the wave-paths emerging at this distance have penetrated deeply into it. Now the chord of 120° reaches a maximum depth from the surface of half the radius, and we have seen that the wave paths up to this distance are convex towards the centre of the Earth, so it may be taken that the central core does not extend beyond 0.4 of the radius from the centre" (Oldham, 1906).



Gutenberg (1913)
-> profondeur du noyau: 2900 km
très proche de la valeur actuelle

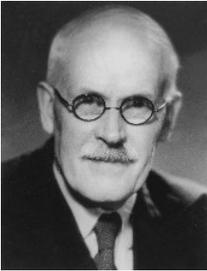
-> vitesse des ondes P décroît de
13.15km/s à 8.5 km/s
(valeurs modernes à ~0.5km/s près)

Beno Gutenberg 1889-1960



Liquidité du noyau:

- Suggérée depuis longtemps par l'amplitude des marées terrestres solides, beaucoup plus importante que si la terre était solide et rigide jusqu'à son centre
- Confirmée par l'absence d'observations d'ondes S à partir de la distance de pénétration dans le noyau.
- Jeffreys (1926): marée terrestre + observations d'ondes S (leur absence): première "preuve" quantitative de l'absence de rigidité du noyau



Sir Harold Jeffreys
1891-1989

Rigidité moyenne de la terre (marées Terrestres) est plus faible que celle du manteau calculée à partir des ondes S

The conclusion we are driven to, then, if we try to retain the law of density considered here, is that most of the matter constituting the central core must be practically devoid of rigidity from the point of view of the theory of the tides and the variation of latitude.

"The rigidity of the Earth's central core", *Geophys. J.* (1926)

Composition du noyau



Francis Birch - 1903-1992

- Démontre en 1952 que le manteau est composé de silicates, le noyau externe, de fer liquide et la graine, de fer cristallin (Birch, 1952, *JGR*).
- Confirme en 1961 que la densité du noyau est ~10% plus faible que celle du fer aux P et T du noyau

- "Unwary readers should take warning that ordinary language undergoes modification to a high-pressure form when applied to the interior of the Earth. A few examples of equivalents follow:"

High Pressure Form	Ordinary Meaning
Certain	Dubious
Undoubtedly	Perhaps
Positive proof	Vague suggestion
Unanswerable argument	Trivial objection
Pure iron	Uncertain mixture of all the elements

Birch, 1952, JGR



Inge Lehmann 1888-1993

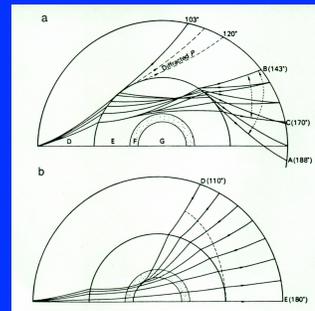
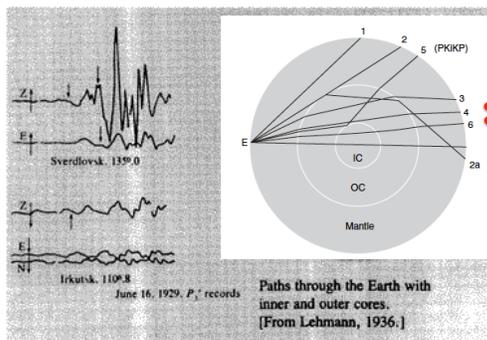
Découverte de la graine: 1936

Observe des phases "P" dans l'ombre du noyau:

Nouvelle phase sismique Appelée P'

Article dont le titre est " P' "

->Existence d'une région interne du noyau aux propriétés élastiques différentes de celles de la partie externe.



d'après B. Gutenberg



Keith Bullen
1906-1976

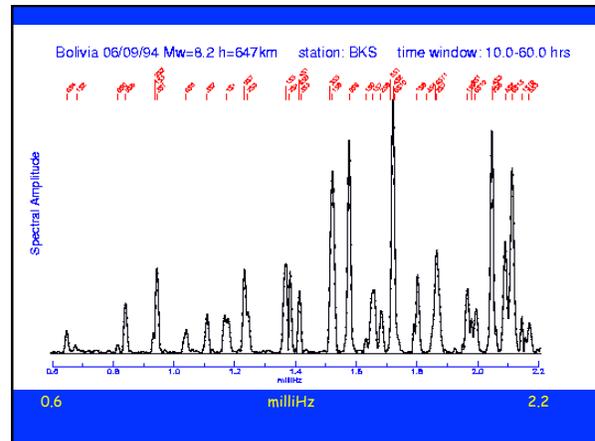
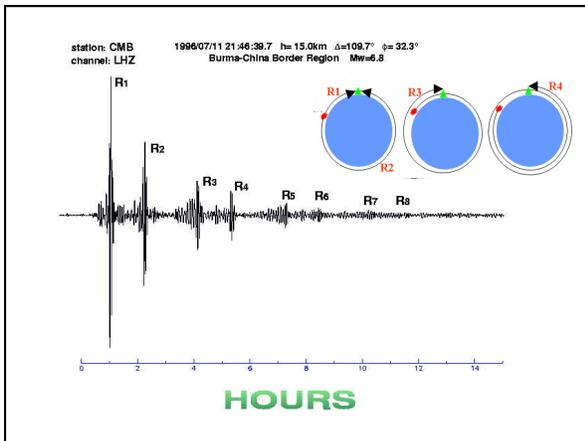
-> Remarque en 1950 que si la graine est solide, on devrait observer des ondes de type PKJKP

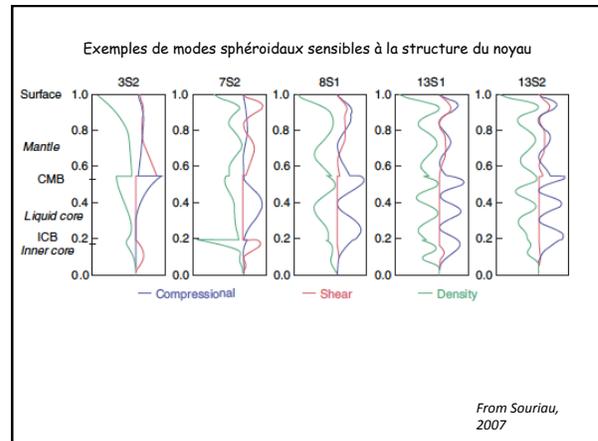
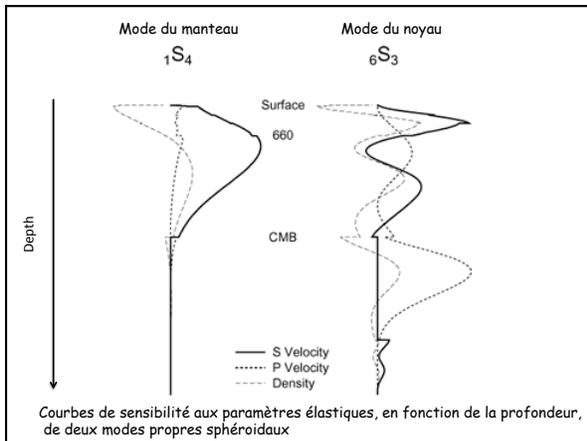
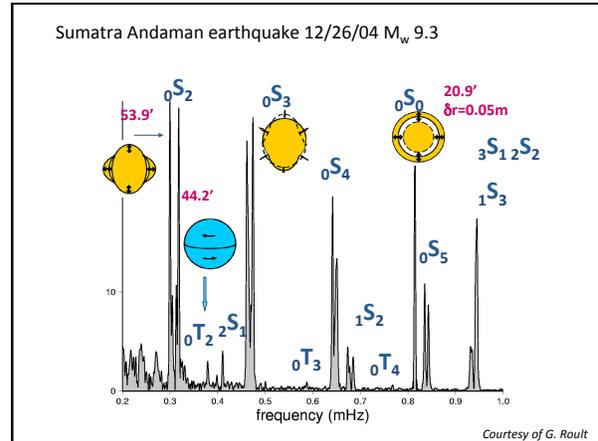
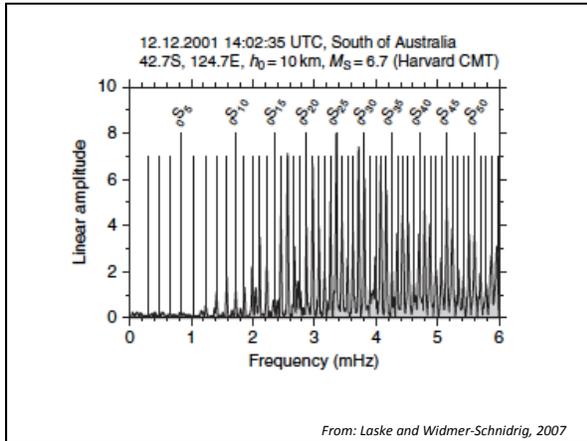
-> calcule les temps de propagation et l'amplitude théoriques de ces ondes et conclue qu'elles seraient à la limite de l'observabilité, mais que la distance la plus favorable pour la chercher serait 130-155°

"Theoretical travel times of S waves in the inner core"
M. N. Geophys. Suppl., 6, 125 (1950)
"Theoretical amplitudes of the seismic phase PKJKP",
163, (1951)

-> Jacobs (1953) montre que l'augmentation du point de fusion du fer avec la pression (profondeur) implique un changement de phase du fer liquide -> solide aux conditions de la limite noyau-graine (Inner Core Boundary -ICB)

-> Faute d'observation concluante de PKJKP, la rigidité non nulle de la graine a été démontrée indirectement par les mesures de fréquences propres de la terre (Dziewonski and Gilbert, 1971; Dziewonski, 1971)





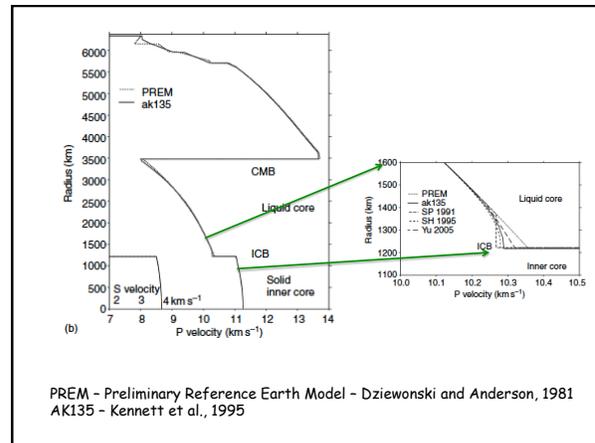
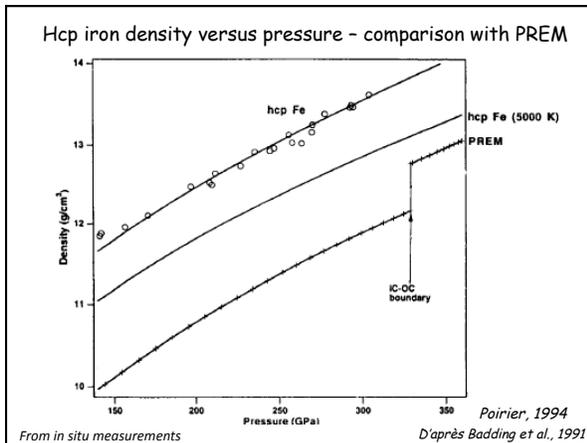
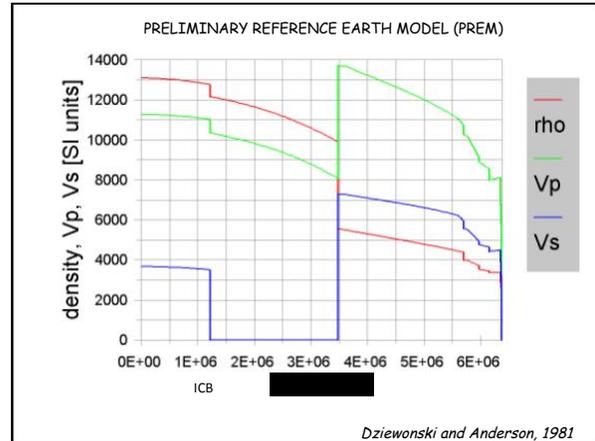
		UTD124B'—Solid inner core						
Mode	Mean period (s)	No. of observations	s.e.m. (s)	Comp. period	Rel. error (%)	Inner core energy		
						Compr.	Shear	
Group 1	${}_1S_0$	613.57	11	0.236	614.59	0.17	0.181	0.000
	${}_2S_0$	398.54	40	0.084	397.59	-0.24	0.206	0.001
	${}_3S_0$	305.84	7	0.129	306.00	0.05	0.233	0.003
	${}_4S_0$	243.59	12	0.067	243.80	0.09	0.192	0.007
	${}_5S_2$	904.23	21	0.487	904.43	0.02	0.001	0.080
Group 2	${}_6S_2$	397.36	11	0.157	397.03	-0.09	0.015	0.102
	${}_7S_1$	348.41	21	0.046	348.23	-0.05	0.068	0.011
	${}_8S_3$	281.37	11	0.113	281.59	0.08	0.004	0.022
	${}_9S_1$	272.10	11	0.144	271.79	-0.11	0.115	0.052
	Nine modes—r.m.s.							

		UTD124B'—Liquid inner core			
		Comp. period	Rel. error (%)	Comp. period	Rel. error (%)
		607.39	-1.02	610.06	-0.57
		392.31	-1.59	391.42	-1.81
		301.36	-1.48	301.84	-1.31
		241.11	-1.03	241.55	-0.84
		914.94	1.17	917.80	1.50
		399.91	0.67	398.20	0.71
		347.10	-0.38	347.38	-0.30
		282.77	0.50	283.34	0.70
		271.00	-0.40	270.92	-0.43

5.08M

→ Vs-ic=3.517 km/s

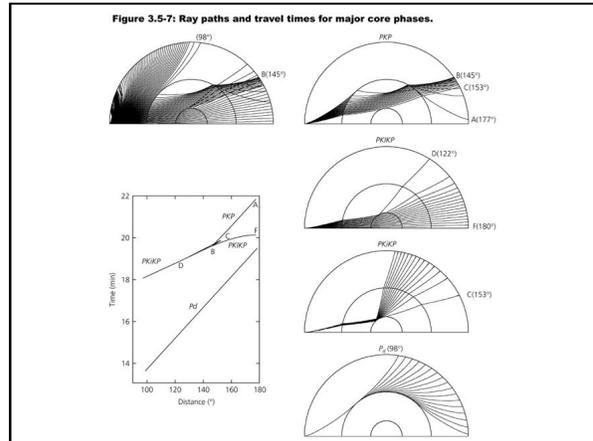
Dziewonski and Gilbert, Nature 1971
Also Dziewonski, Science, 1971- radial modes



Paramètres physiques du noyau –à partir du modèle PREM (Dziewonski and Anderson, 1981)

	Radius (km)	Depth (km)	V_p (km s ⁻¹)	V_s (km s ⁻¹)	Density (g cm ⁻³)	Pressure (GPa)	Temperature (°K)	Gravity (m s ⁻²)	Ellipticity
Mantle and crust	6371	0	5.80	3.20	2.60	0	300	9.81	1/298.3
(Silicates of Fe, Mg)	3480	2891	13.72	7.26	5.57	140	3800 (3500-3700)	10.7	1/392.7
	3479.5	2891.5	13.66	7.28					
Core-mantle boundary (CMB)									
Liquid core	3480	2891	8.06	0	9.90	140	3800	10.7	1/392.7
	3479.5	2891.5	8.00	0			3000-5800		
	1221.5	5149.5	10.36	0	12.17	330	4000 (4000-7600)	4.4	1/411
(Iron + light elements)	1217.5	5153.5	10.29	0					
Inner core boundary (ICB)									
Inner core (Almost pure iron)	1221.5	5149.5	11.03	3.50	12.76	330	4000	4.4	1/411
	1217.5	5153.5	11.04	3.50			4000-7600		
	0	6371	11.26	3.67	13.09	360	5000 (5000-8000)	0	0
	0	6371	11.26	3.67					

D'après Souriau, 2007, Treatise on Geophysics



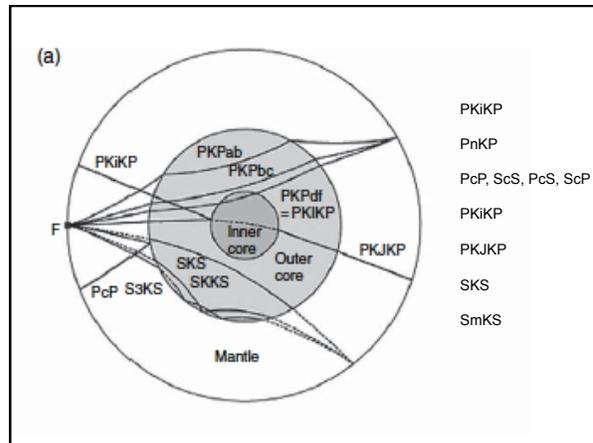
Nomenclature des ondes sismiques de volume

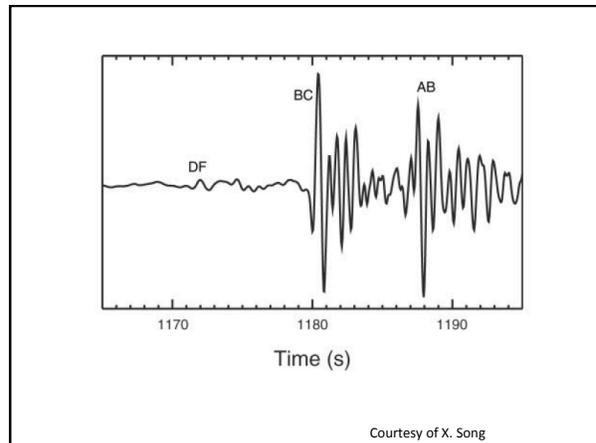
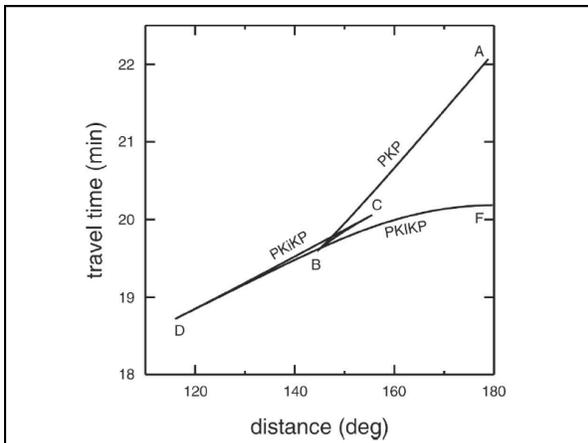
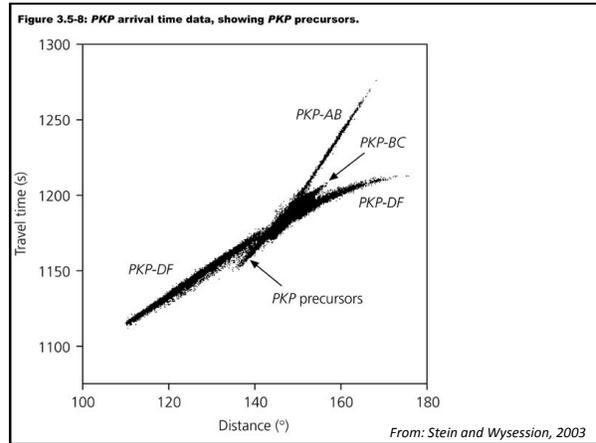
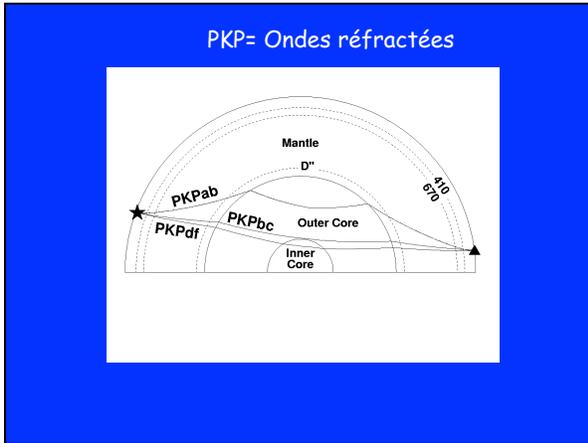
Dans le manteau:
 P ondes de compression dans le manteau
 S ondes de cisaillement dans le manteau
 c réflexion sur la CMB

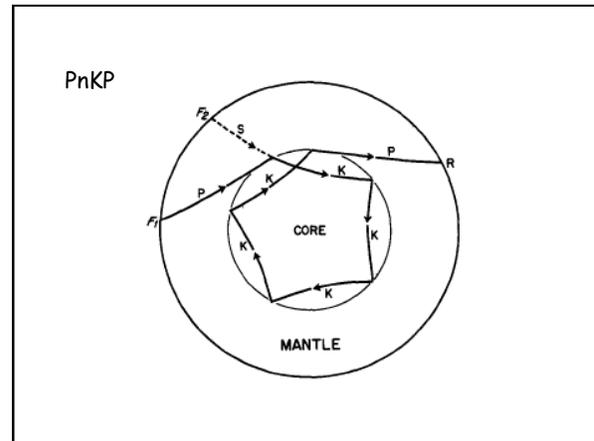
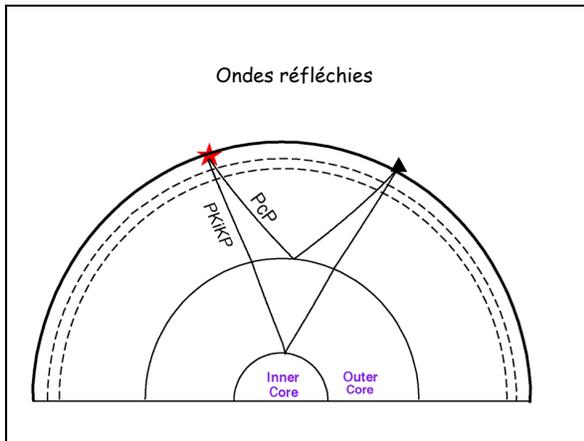
D'où PKP et SKS...
 PcP onde réfléchie sur la CMB

Dans le noyau:
 i réflexion sur l'ICB
 K ondes de compression dans le noyau externe
 I ondes de compression dans le noyau interne

D'où PKIKP ou PKiKP







Informations contenues dans les modes propres

- > Information sur la densité
- > Information sur la structure en cisaillement dans la graine
- > Basses fréquences (~mHz)
- > Energie concentrée dans le noyau externe et la partie externe de la graine
- > Observations basées seulement sur les très forts séismes

Physique des matériaux

- Expérimentation
 - Pressions actuellement atteintes
 - ~200Gpa (DAC)
 - Ondes de choc au delà de ces pressions
 - Mesures instantanées (état d'équilibre non atteint)
 - problème pour estimer de manière précise la température)
- Calculs théoriques ab initio
 - Résultats dépendent des approximations faites

Quelques questions d'actualité

- Composition du noyau et de la graine: quels sont les éléments légers majoritaires dans le noyau?
 - Modèles minéralogiques (calculs théoriques et résultats expérimentaux)
 - Contraste de densité à l'ICB (sismologie)
 - Profil de vitesses sismiques et densité dans le noyau externe (couches limites à l'ICB et à la CMB?)

Structure et composition de la graine

- Anisotropie de la graine
- Structure cristalline du fer aux températures et pressions de la graine
- Evolution du noyau: quand la graine est elle apparue?

La graine: Sujets d'intérêt (sismologie)

- Anisotropie de la graine
- Solidité de la graine: observation d'ondes de cisaillement PKJKP
- Contraste de densité à la limite noyau externe/graine (ICB)
- Hétérogénéités près de la surface de la graine
- Rotation différentielle

References - Cours #1 - Noyau de la terre - B. Romanowicz

- Brush, S. (1980) Discovery of the Earth's core, *Am. J. Phys.*, 48, 704
- Brush, S. (1979) Nineteen'th century debates about the Inside of the Earth: solid, liquid, or gas?, *Annals of Science*, 36, 225-254.
- Dziewonski, A. M. (1971) *Science*, 172, 1336.
- Dziewonski, A. M. and F. Gilbert (1971) Solidity of the inner core of the Earth inferred from Normal Mode Observations, *Nature*, 234, 465.
- Gutenberg, B. (1960) Low-velocity layers in the Earth, *Ocean and Atmosphere, Science*, 131, 959
- Jeffreys, H. (1926) The rigidity of the earth's central core, *Geophys. J.*, 1, 371-383.
- Lehmann, I. (1936) P', *Bureau Central Sismologique International*, A14, 3-31.
- Oldham, R. (1906) The constitution of the earth's interior, as revealed by earthquakes, *Quart. J. Geophys. Soc.*, 456.
- Souriau, A. (2007) Deep Earth Structure - The Earth's cores, *Treatise on Geophysics*, Vol 1, B. Romanowicz and A. Dziewonski, Eds., 655.