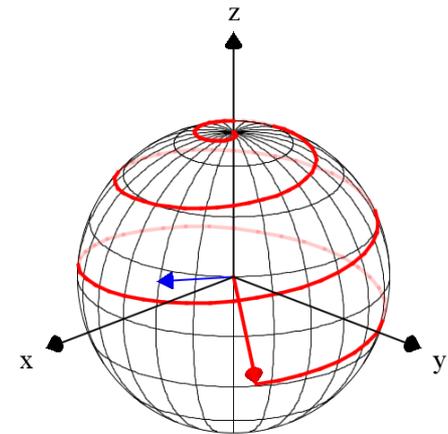
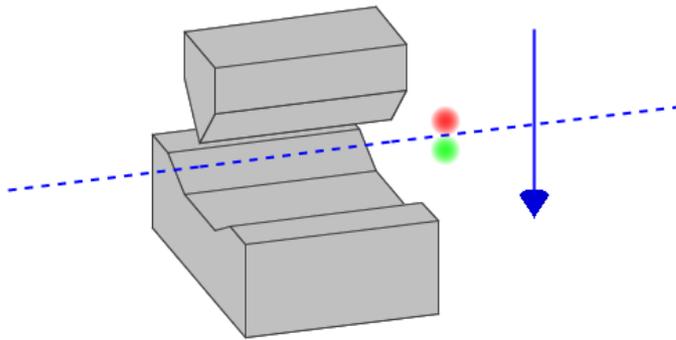


Pédagogie active appliquée à l'enseignement de la physique quantique à l'Ecole Polytechnique

Manuel Joffre
Département de physique
Ecole Polytechnique



Pourquoi la pédagogie active ?

Définition (un peu méchante) de la pédagogie « passive » :

“It is all too reminiscent of an old definition of the lecture method of classroom instruction: a process by which the contents of the textbook of the instructor are transferred to the notebook of the student without passing through the heads of either party.”

Darrell Huff, *How to lie with statistics* (Norton, New York, 1954)

Cité par Eric Mazur dans *Farewell, lecture ?* (Science 323, 50 (2009))

➤ L'enseignement de physique quantique à l'X

➤ Expériences numériques

<http://www.quantum-physics.polytechnique.fr>

➤ Questionnaires en ligne

Identifiant :	<input type="text"/>
Mot de passe :	<input type="password"/>

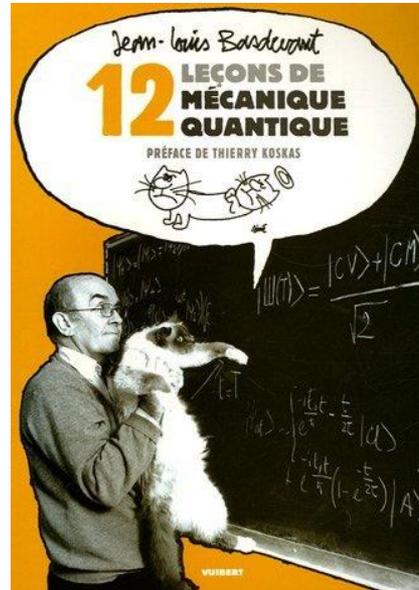
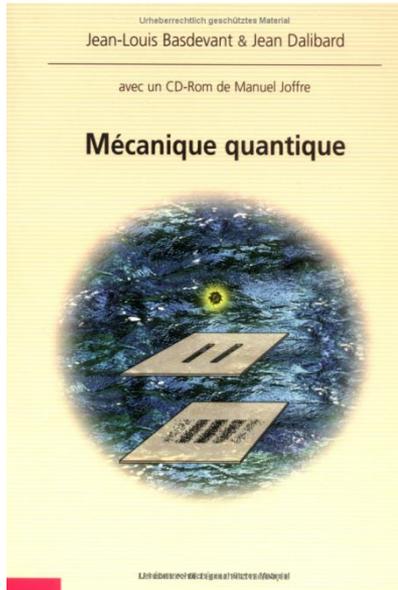
➤ Vote électronique



L'enseignement de physique à l'X

- Année 1 (mai-juillet) : tronc commun pluridisciplinaire **(500 élèves)**
 - ✓ Mécanique quantique (7 séances) : Jean Dalibard et Philippe Grangier
- Année 2 : enseignement pluridisciplinaire au choix
 - ✓ Relativité (9 séances) : Christoph Kopper et Roland Lehoucq **(220 élèves)**
 - ✓ Physique quantique (7 séances) : Manuel Joffre **(430 élèves)**
 - ✓ Physique statistique (11 séances) : Jean-Philippe Bouchaud, Gilles Montambaux, Rémi Monasson **(430 élèves)**
 - ✓ MODAL : Module d'enseignement expérimental en laboratoire (9 séances)
Environ **100 élèves** en physique ou électronique
- Année 3 : enseignement spécialisé
 - ✓ Programme d'approfondissement de physique : environ **50 élèves**
- Année 4 : formations très diversifiées
 - ✓ M2 en France ou à l'étranger, écoles d'application, corps de l'Etat, etc.

L'enseignement de physique quantique à l'X



Jean Dalibard



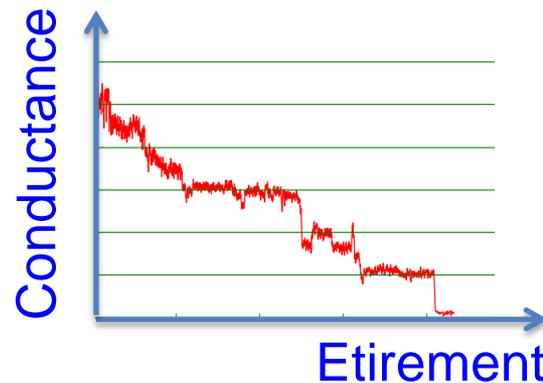
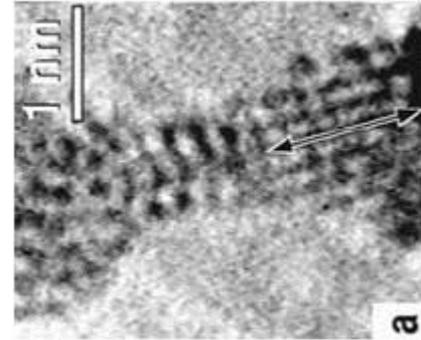
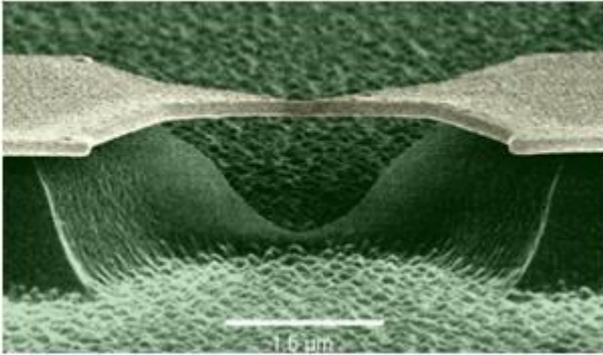
Philippe Grangier

« Mécanique quantique », Jean-Louis Basdevant et Jean Dalibard
Les éditions de l'École Polytechnique

« 12 leçons de mécanique quantique », Jean-Louis Basdevant, Vuibert

Approche expérimentale : la meilleure pédagogie active

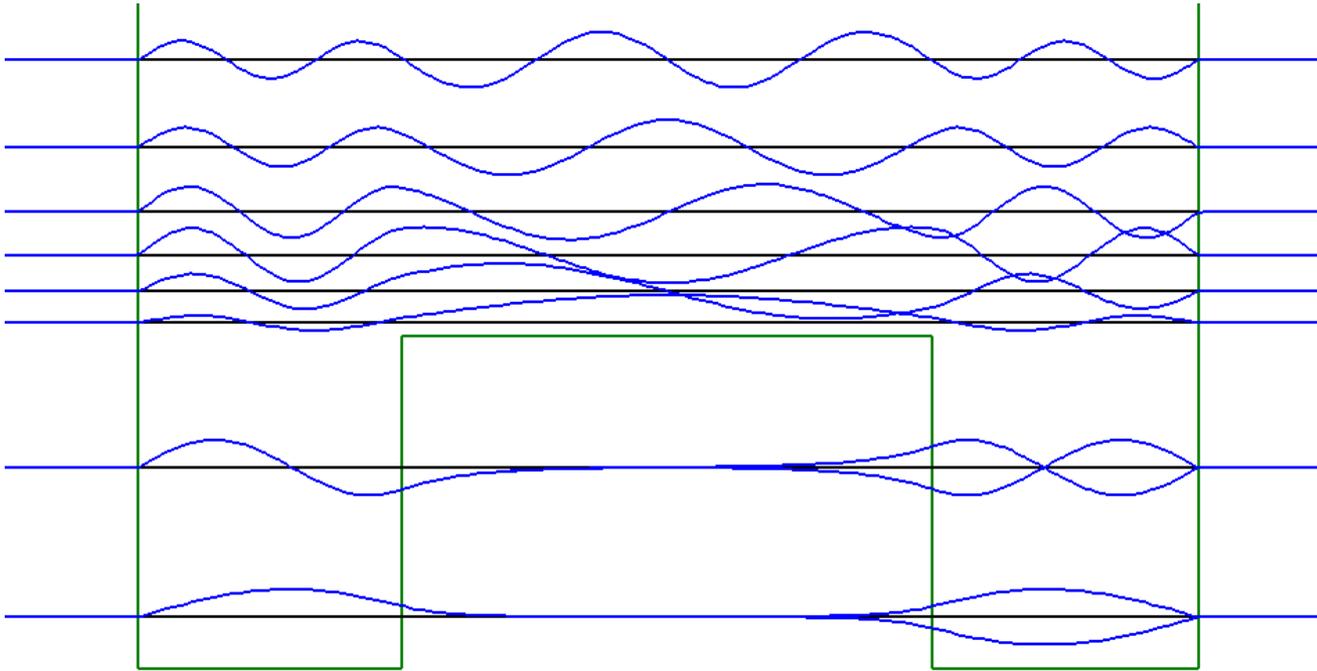
Exemple : MODAL sur la jonction à cassure (4 élèves)



Olivier Klein
Chercheur au CEA (IRAMIS)
Chargé d'enseignement à l'École polytechnique

Expériences numériques en physique quantique

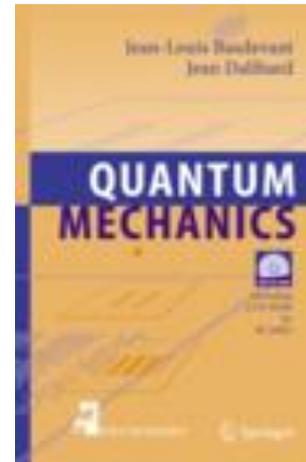
Collaboration avec Jean-Louis Basdevant et Jean Dalibard



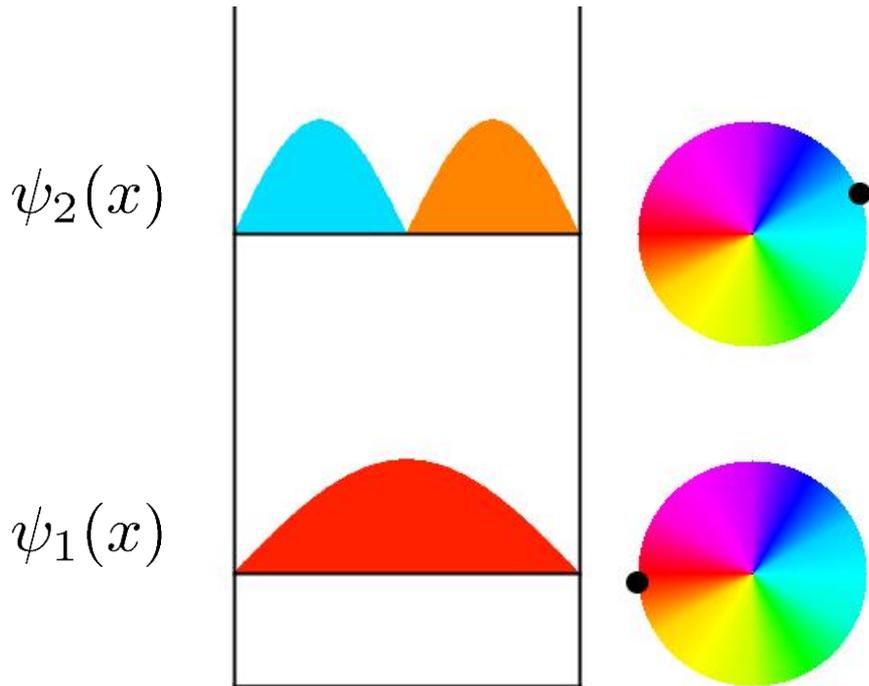
<http://www.quantum-physics.polytechnique.fr>

Voir aussi : <http://phet.colorado.edu>

<http://www.toutestquantique.fr/>

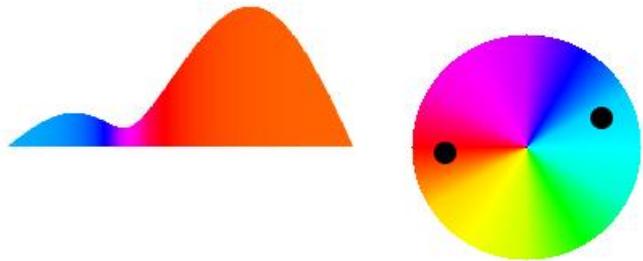


Exemple 1 : superposition linéaire



$$|\psi_2(t)\rangle = \exp(-i\omega_2 t) |\psi_2\rangle$$

$$|\psi_1(t)\rangle = \exp(-i\omega_1 t) |\psi_1\rangle$$

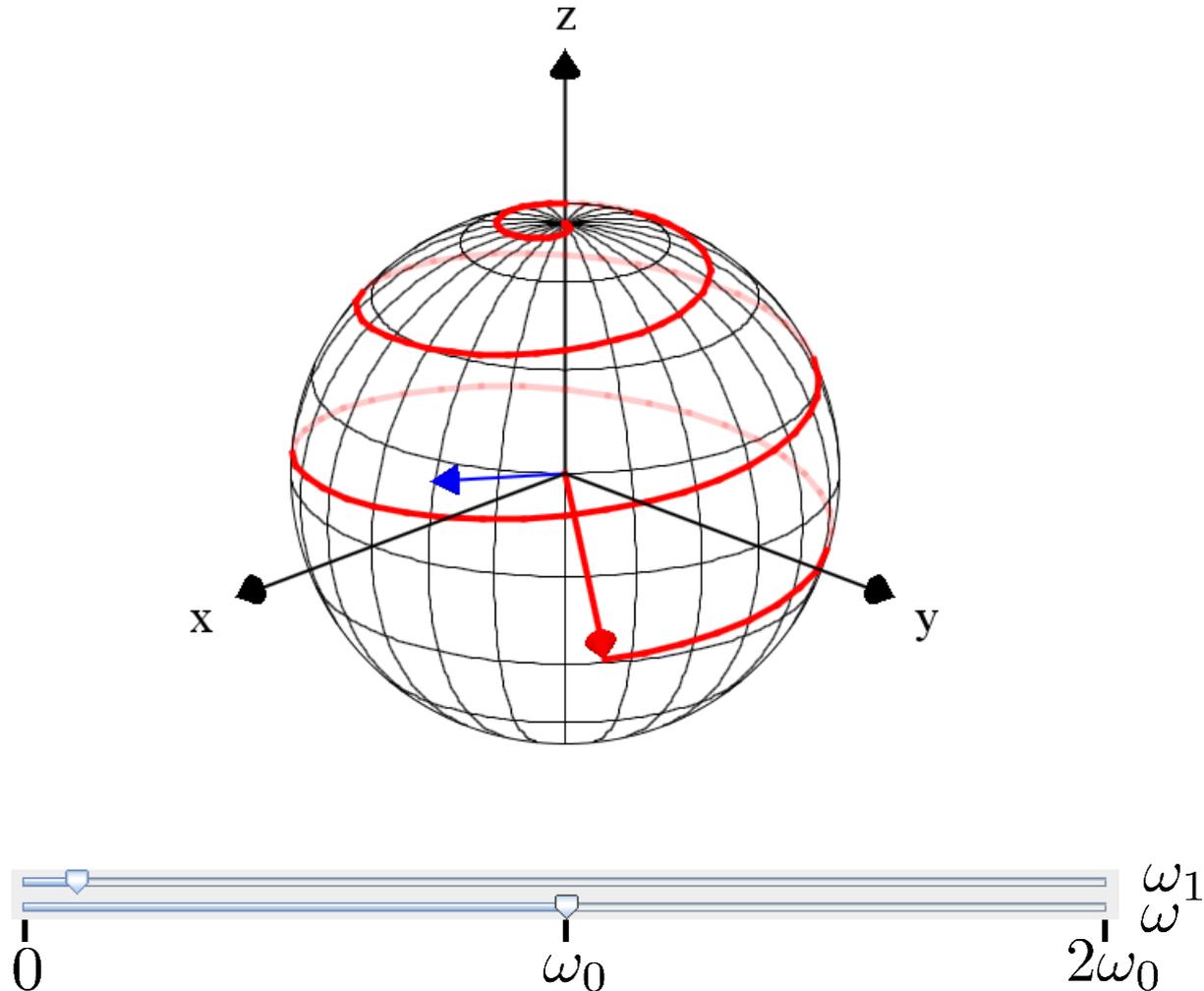


$$|\psi(0)\rangle = \frac{|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle}{\sqrt{2}}$$

$$|\psi(t)\rangle = \frac{e^{-i\omega_1 t} |\psi_1\rangle + e^{-i\omega_2 t} |\psi_2\rangle}{\sqrt{2}}$$

Exemple 2 : résonance magnétique nucléaire

Spin $\frac{1}{2}$ placé dans un champ magnétique fixe selon l'axe z et dans un champ magnétique tournant dans le plan xy.



Voir une expérience numérique c'est bien,
la manipuler soi-même c'est mieux.

Questionnaires en ligne hebdomadaires

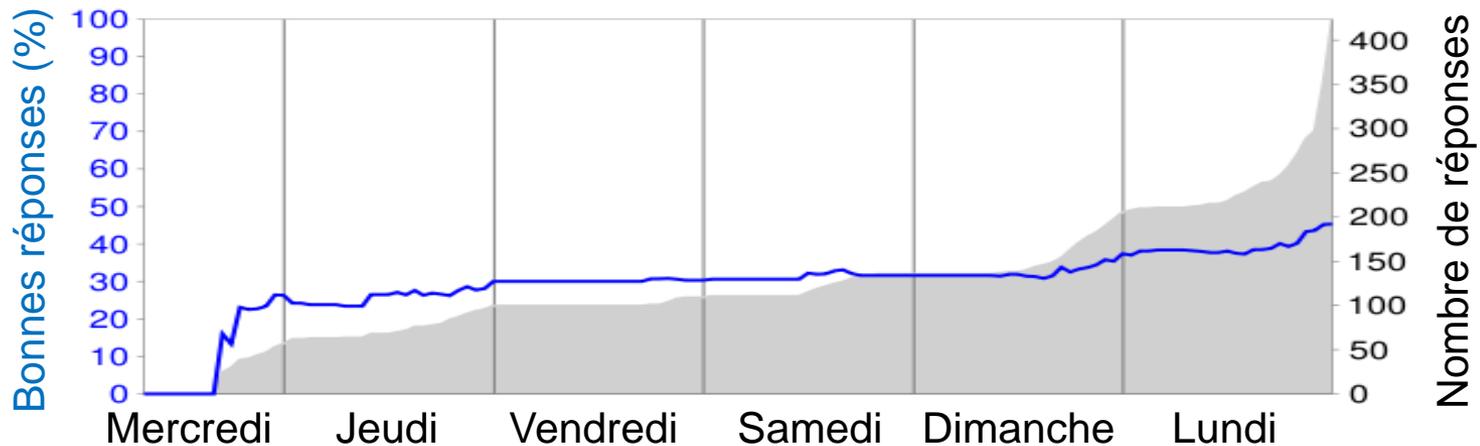
Objectif pédagogique :

- Inciter les élèves à effectuer un travail régulier
- Evaluer le taux de participation des élèves
- Aider les élèves (et les enseignants) à vérifier leur bonne compréhension du cours

Identifiant :	<input type="text"/>
Mot de passe :	<input type="password"/>

Mise en œuvre pratique :

- Entrée des questions et des réponses par les enseignants
- Mise en ligne automatique du questionnaire le jour du cours
- Les étudiants s'identifient par mot de passe et répondent à ~ 4 questions par semaine
- Clôture deux jours avant le cours suivant et mise en ligne immédiate des réponses
- Aujourd'hui utilisé par 10 cours à l'Ecole Polytechnique



Point de vue des élèves

1) Superposition linéaire de deux états propres

On considère un système placé dans un état $|\psi\rangle$ proportionnel au vecteur $i|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle$, où $|\psi_1\rangle$ et $|\psi_2\rangle$ sont deux états propres du hamiltonien associés aux valeurs propres E_1 et E_2 . Quelle est la valeur moyenne de l'énergie?

- $(E_2 - E_1)/2$,
- $E_2 - E_1$,
- $(E_1 + E_2)/2$,
- $E_1 + E_2$,
- $iE_1 + E_2$.

Après normalisation, l'état du système s'écrit $|\psi\rangle = (i|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle)/\sqrt{2}$ et la valeur moyenne de l'énergie s'écrit

$$\langle E \rangle = \langle \psi | H | \psi \rangle = \frac{1}{2}(-i\langle \psi_1 | + \langle \psi_2 |)(iE_1|\psi_1\rangle + E_2|\psi_2\rangle)$$

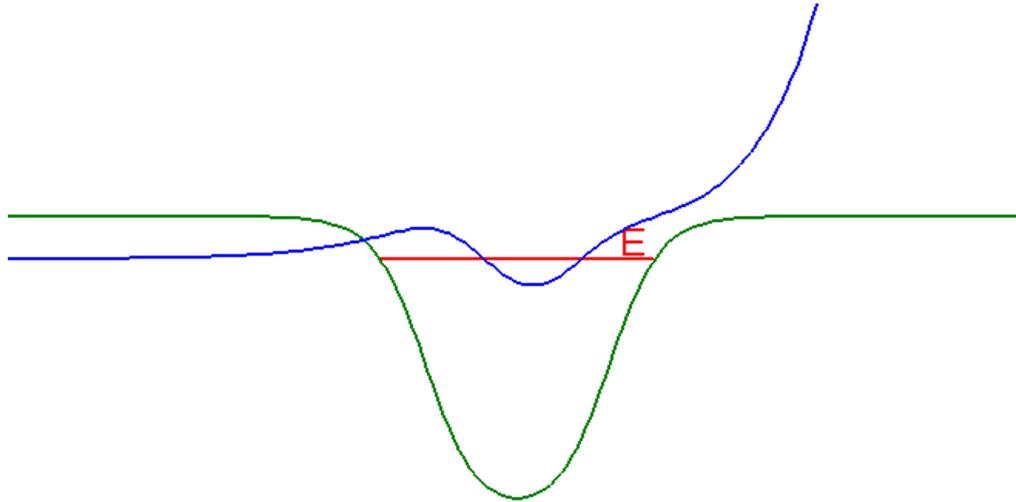
soit $\langle E \rangle = \frac{1}{2}(E_1 + E_2)$. Attention à normaliser le vecteur d'état et à bien conjuguer les coefficients complexes dans l'écriture du bra $\langle \psi |$.

Questionnaires en ligne et expérience numérique (1/2)

Nombre d'états liés dans un puits de potentiel

La fonction tracée en bleu est une fonction d'essai, solution unique de l'équation

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + (V(x) - E)\psi(x) = 0 \text{ tendant vers zéro lorsque } x \rightarrow -\infty.$$



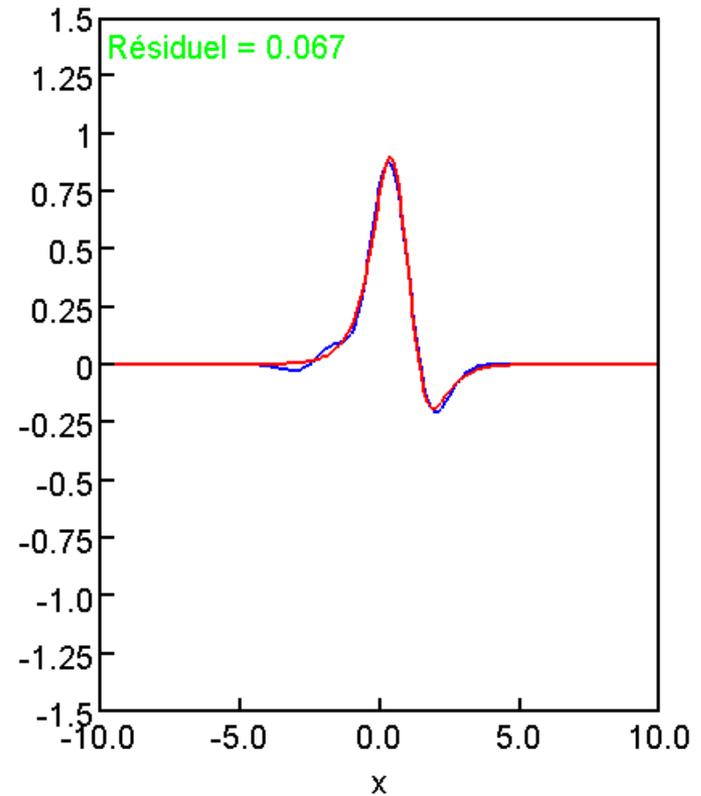
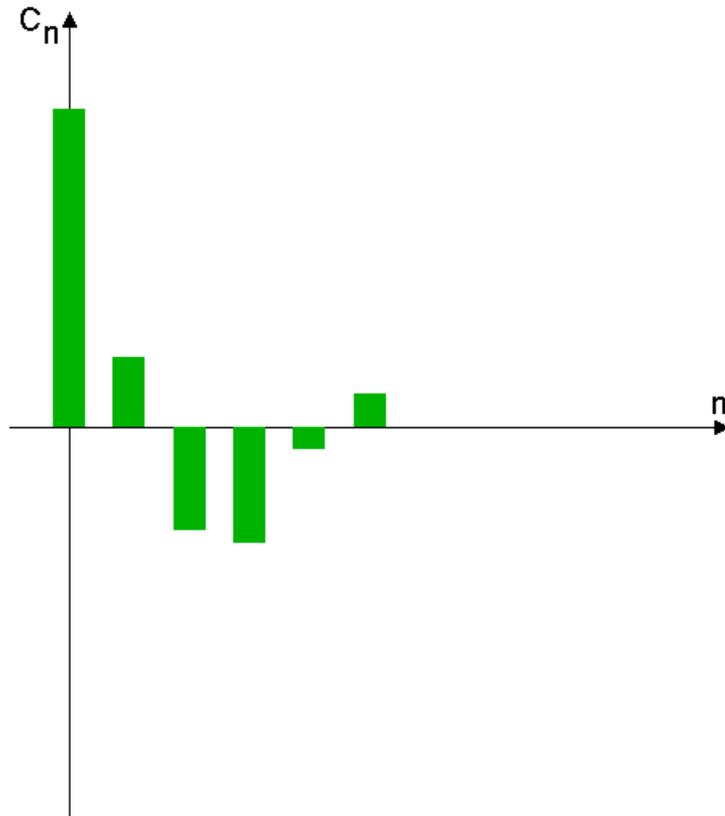
Quel est le nombre d'états liés dans le puits de potentiel ci-dessus ?

- 1
- 2
- 3
- 4
- Infini

➡ L'élève utilise l'expérience numérique pour trouver la réponse.

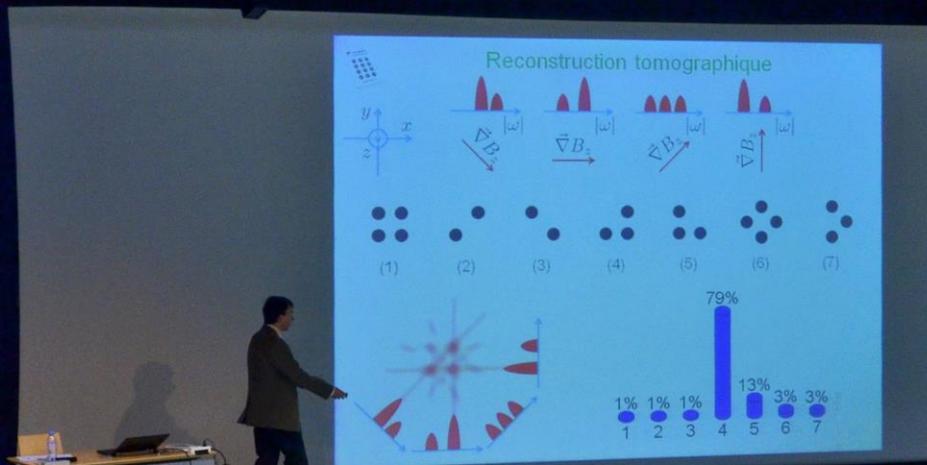
Questionnaires en ligne et expérience numérique (2/2)

Utilisation des fonctions de Hermite pour se familiariser avec la structure d'espace de Hilbert



➡ La réponse de l'élève est l'état final de l'expérience numérique.

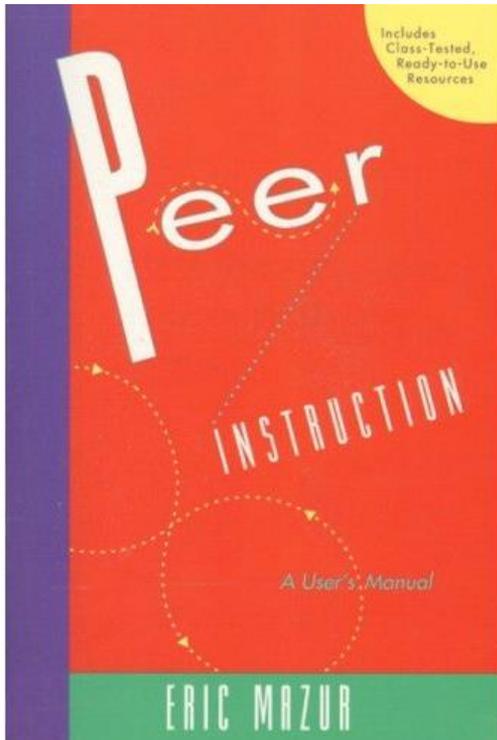
Vote électronique



Objectif pédagogique :

- Instaurer une atmosphère plus interactive
- Améliorer la participation des élèves
- Exercer l'esprit critique et l'esprit physique
- Attirer l'attention sur des points délicats avant d'engager une discussion

Peer instruction

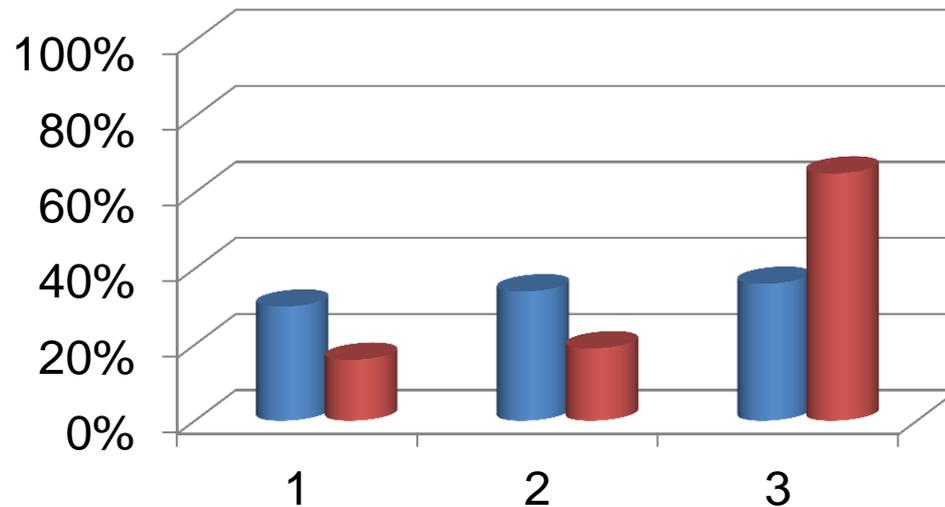


© Ecole Polytechnique, Ph. Lavalie

Exemple de peer instruction

Est-il toujours exact que $H\Psi = E\Psi$?

1. Oui
2. Oui, si l'hamiltonien est indépendant du temps
3. Non

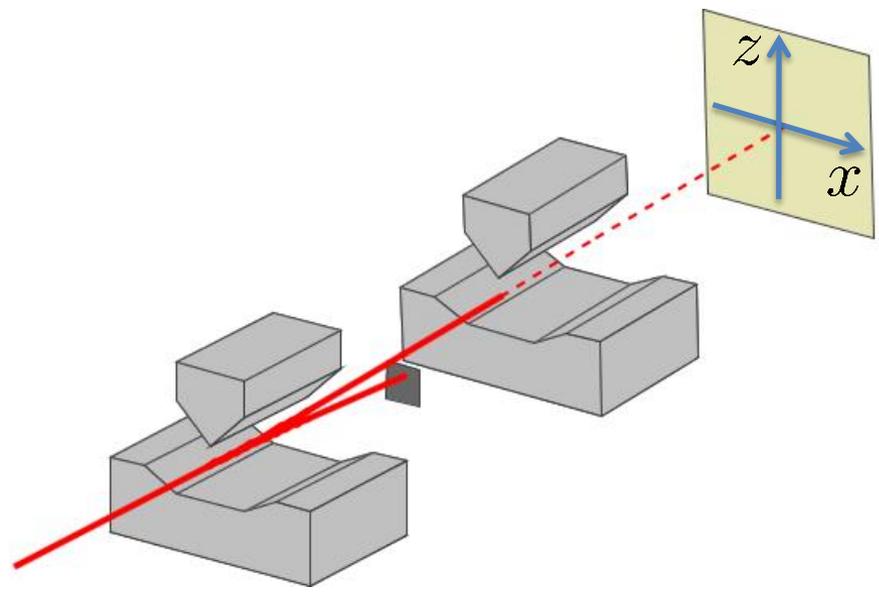


➡ Ca marche !

➡ Cependant, les élèves prennent l'habitude de discuter entre eux dès le premier vote, ce qui rend le second vote parfois inutile.

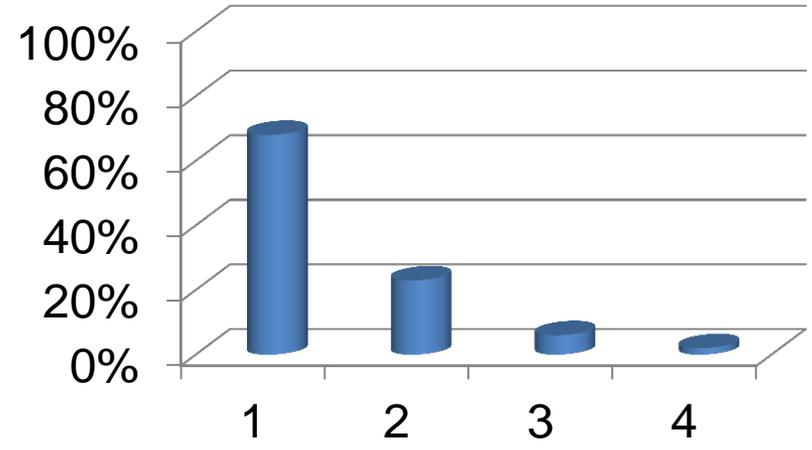


Deviner le résultat d'une expérience



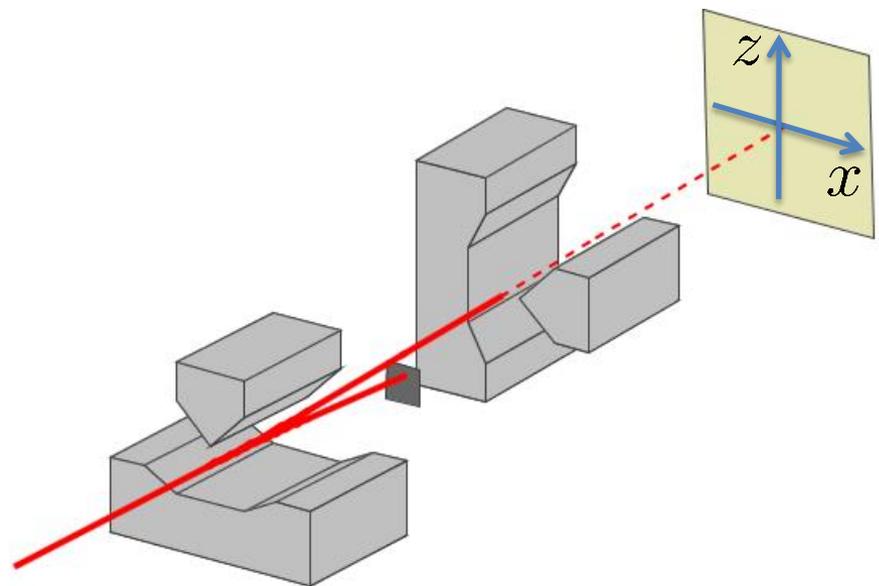
Qu'observe-t-on en aval du second appareil de Stern et Gerlach ?

- 1. Une seule tache
- 2. Deux taches identiques
- 3. Impossible de prévoir le résultat
- 4. Je ne sais pas



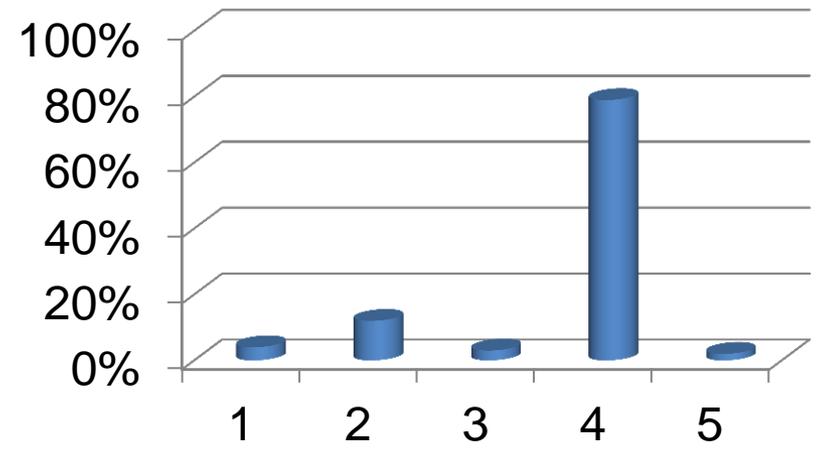


Mesure selon l'axe x



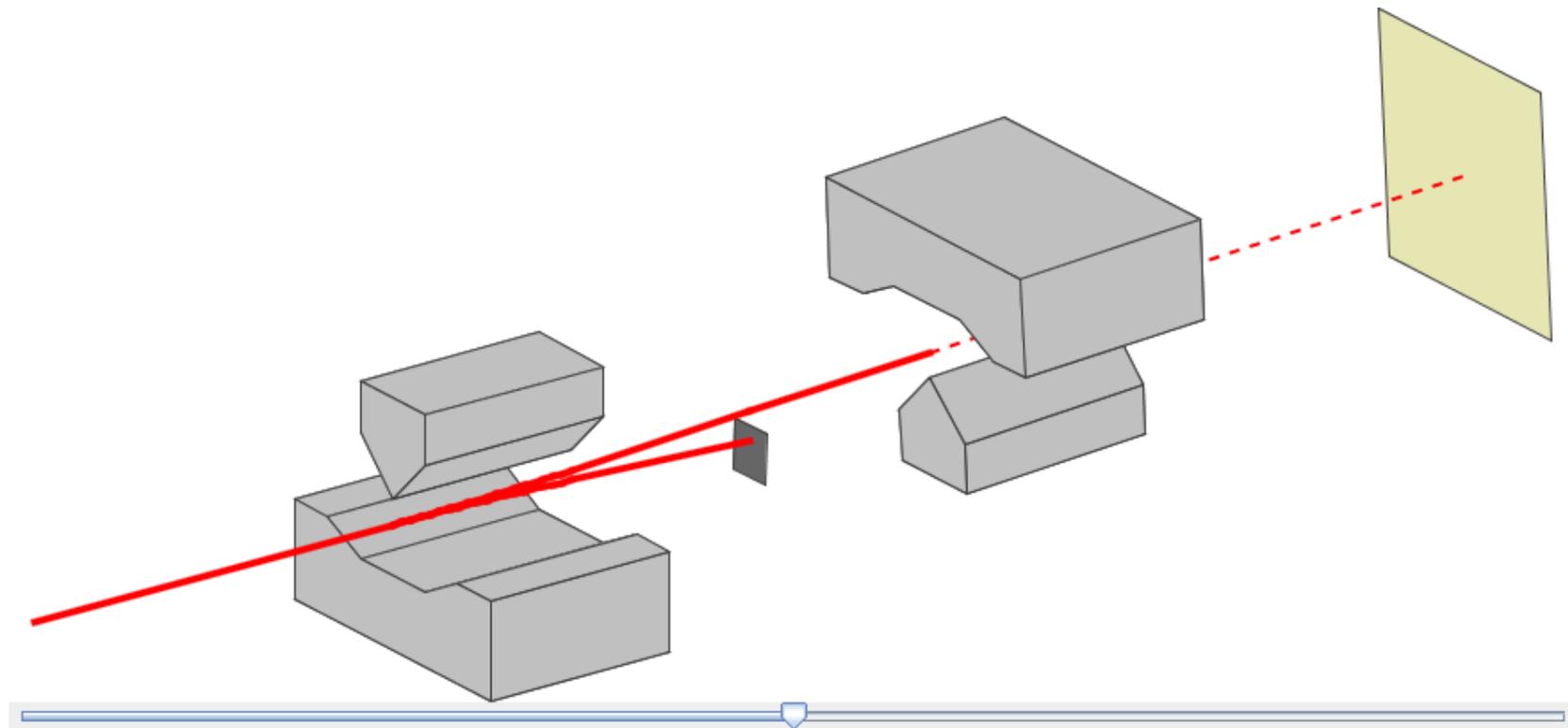
Qu'observe-t-on en aval du second appareil de Stern et Gerlach ?

- 1. Une seule tache au centre 
- 2. Une seule tache décalée 
- 3. Deux taches identiques décalées selon z 
- 4. Deux taches identiques décalées selon x 
- 5. Je ne sais pas



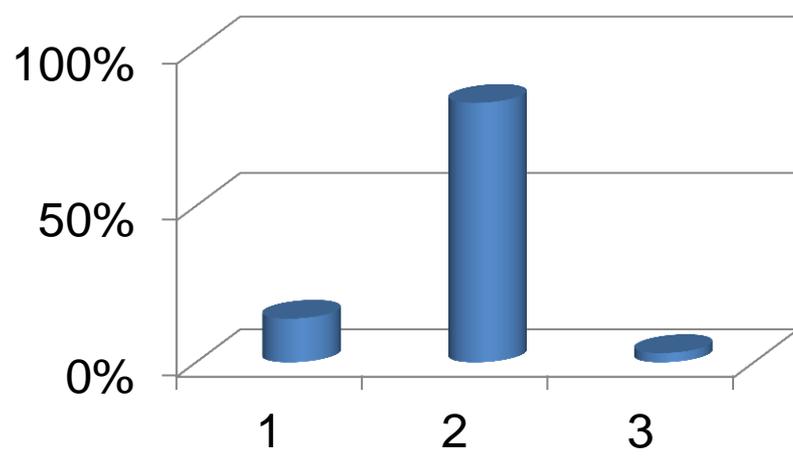


Cas d'un retournement de 180°



Le second SG est tourné de 180°.
On observe:

- 1. Un faisceau dévié vers le haut
- 2. Un faisceau dévié vers le bas
- 3. Deux faisceaux



Remerciements

Les élèves de l'Ecole Polytechnique pour leur participation active.

Les enseignants physiciens de l'Ecole Polytechnique impliqués en pédagogie active, notamment Jean Dalibard, Mathieu de Naurois, Frédéric Chevy, Jérôme Faure et Riad Haidar.

La direction et les services de l'Ecole Polytechnique pour leur soutien.

Eric Mazur (Harvard University)

Brad Gant (Turning Technologies)

Quelques références

- « Mécanique quantique », Jean-Louis Basdevant et Jean Dalibard, *Les éditions de l'Ecole polytechnique*.
- *Les enregistrements vidéo de l'ensemble des cours de physique quantique de 1^{ère} et 2^{ème} année sont disponible sur le site web du département de physique : <http://www.physique.polytechnique.edu>.*
- *Diapos animées du cours de physique quantique de 2^{ème} année :*
<http://www.enseignement.polytechnique.fr/profs/physique/Manuel.Joffre/phy432/>
- <http://www.quantum-physics.polytechnique.fr/>