

Introduction : comment se représenter l'électron ?

Un jeu pour lister les différentes visions de l'électron

Quelques notions de didactique pour organiser tout ça

Des stratégies didactiques pour enseigner la mécanique quantique

Conclusion : que faire ?

# Les représentations mentales de l'électron : un choix didactique

Alain Le Rille

Société Chimique de France  
Société Française d'Histoire de la Chimie

samedi 14 décembre 2024

Introduction : comment se représenter l'électron ?

Un jeu pour lister les différentes visions de l'électron

Quelques notions de didactique pour organiser tout ça

Des stratégies didactiques pour enseigner la mécanique quantique

Conclusion : que faire ?

Qu'est-ce qu'un électron ?

Comment parler de l'électron ?

# L'objet "électron", fondement de la chimie

De quelle nature ?

Joseph John Thomson



prix Nobel de physique de  
1906 : l'électron particule

George Paget Thomson



prix Nobel de physique de  
1937 : l'électron onde

Introduction : comment se représenter l'électron ?

Un jeu pour lister les différentes visions de l'électron

Quelques notions de didactique pour organiser tout ça

Des stratégies didactiques pour enseigner la mécanique quantique

Conclusion : que faire ?

Qu'est-ce qu'un électron ?

Comment parler de l'électron ?

# Comment parler de l'électron

La « crise de mots »



« Nous nous trouvons [...] sur la voie [...] de l'adaptation de nos formes d'intuition, empruntées aux impressions sensorielles, à la connaissance [...]. Les obstacles que nous rencontrons dans cette voie proviennent avant tout du fait que pour ainsi dire chaque terme de notre langage est lié à ces formes de représentation. »



« Dès qu'on quitte les mathématiques, on se retrouve sur le terrain du langage commun qui est incapable de fournir les concepts et les mots adéquats. »

Introduction : comment se représenter l'électron ?

Un jeu pour lister les différentes visions de l'électron

Quelques notions de didactique pour organiser tout ça

Des stratégies didactiques pour enseigner la mécanique quantique

Conclusion : que faire ?

Qu'est-ce qu'un électron ?

Comment parler de l'électron ?

## Comment parler de l'électron

Parler malgré tout ?

Évacuer purement et simplement le problème en continuant d'utiliser le vocabulaire descriptif hérité de la physique classique : « particules », « propriétés », « trajectoires », etc. langage flou et approximatif vs formalisme mathématique correct. . . au risque du fumeux



*Pas de stratégie : des représentations incohérentes*

Introduction : comment se représenter l'électron ?

Un jeu pour lister les différentes visions de l'électron

Quelques notions de didactique pour organiser tout ça

Des stratégies didactiques pour enseigner la mécanique quantique

Conclusion : que faire ?


Qu'est-ce que le réel en chimie ?

Une unique mécanique quantique ?

Une mécanique quantique, des interprétations

## Un jeu : qui veut gagner des quantons ?

Une question (habituelle)



**Quantons**

**Où se trouve l'électron dans l'atome d'hydrogène (non excité)?**

Introduction : comment se représenter l'électron ?

Un jeu pour lister les différentes visions de l'électron

Quelques notions de didactique pour organiser tout ça

Des stratégies didactiques pour enseigner la mécanique quantique

Conclusion : que faire ?


Qu'est-ce que le réel en chimie ?

Une unique mécanique quantique ?

Une mécanique quantique, des interprétations

# Un jeu : qui veut gagner des quantons ?

Les différentes réponses possibles



**Où se trouve l'électron dans l'atome d'hydrogène (non excité) ?**

**A: shut up and calculate**      **B: un peu partout**

**C: nulle part**      **D: quelque part**

Introduction : comment se représenter l'électron ?

Un jeu pour lister les différentes visions de l'électron

Quelques notions de didactique pour organiser tout ça

Des stratégies didactiques pour enseigner la mécanique quantique

Conclusion : que faire ?

Qu'est-ce que le réel en chimie ?

Une unique mécanique quantique ?

Une mécanique quantique, des interprétations

# Un jeu : qui veut gagner des quantons ?

Le détail des réponses

A : shut up and calculate



la question n'a pas de sens !  
La physique ne parle pas du réel, elle prédit des résultats d'expérience

B : onde seule



partout car l'électron s'est dissous !  
j'ai un outil prédictif pour la mesure (l'onde) qui est le réel

C : onde ou particule



nulle part !  
on ne peut pas saisir simplement le réel (l'onde qui devient une particule)

D : onde et particule



quelque part !  
j'ai un outil prédictif pour la mesure (l'onde) sur le réel (la particule)

*Divergences sur l'interprétation de la mécaQ.*

Introduction : comment se représenter l'électron ?

Un jeu pour lister les différentes visions de l'électron

Quelques notions de didactique pour organiser tout ça

Des stratégies didactiques pour enseigner la mécanique quantique

Conclusion : que faire ?

Un obstacle épistémologique insurmontable ?

Apprendre consiste à dépasser ses conceptions

La notion de conception en didactique

Comment faire avec les conceptions

## La mécanique quantique : un obstacle épistémologique insurmontable ?



ALBERT MESSIAH

Mécanique  
quantique



« personne ne comprend vraiment la physique quantique »

la mécanique quantique « est difficile à saisir intuitivement »

« le praticien de la mécanique quantique aboutit régulièrement à des prédictions contraires à son intuition initiale »

*Est-ce une spécificité de la mécaQ ? Et l'intuition, c'est quoi ?*



Introduction : comment se représenter l'électron ?

Un jeu pour lister les différentes visions de l'électron

Quelques notions de didactique pour organiser tout ça

Des stratégies didactiques pour enseigner la mécanique quantique

Conclusion : que faire ?

Un obstacle épistémologique insurmontable ?

Apprendre consiste à dépasser ses conceptions

La notion de conception en didactique

Comment faire avec les conceptions

## obstacle épistémologique :

un problème bien connu en didactique

**Bachelard**

La formation  
de l'esprit  
scientifique

L'obstacle épistémologique = ce qui vient se placer entre le désir de connaître du scientifique et l'objet qu'il étudie.

**éduscol**

Informier et accompagner  
les professionnels de l'éducation



« il s'agit d'effectuer avec les élèves un long travail de fissuration et de dépassement de conceptions intuitives tenaces et de contribuer de manière efficace à la mise en place d'un raisonnement nouveau »

**Bachelard**

La formation  
de l'esprit  
scientifique

« on connaît contre une connaissance antérieure ».  
connaissance antérieure = "conception" en didactique

*Surmonter un obstacle épistémologique, c'est dépasser ses conceptions (désapprendre pour apprendre)*

Introduction : comment se représenter l'électron ?

Un jeu pour lister les différentes visions de l'électron

Quelques notions de didactique pour organiser tout ça

Des stratégies didactiques pour enseigner la mécanique quantique

Conclusion : que faire ?

Un obstacle épistémologique insurmontable ?

Apprendre consiste à dépasser ses conceptions

La notion de conception en didactique

Comment faire avec les conceptions

## les conceptions en didactique :

l'exemple de la mécanique classique

**Bachelard**  
La formation  
de l'esprit  
scientifique

Titre : 2000 2000

Le suivi des  
conceptions des  
lycéens en mécanique :  
développement et  
usages d'exercices  
informatisés  
Mots Clés :

Revue Internationale de Philosophie,  
n°212, 2 (juin 2000), 199-242.

Interprétations et  
significations en  
physique quantique  
Michel PATY

l'adolescent arrive en classe de physique avec des connaissances empiriques déjà constituées

notions manipulées (force, vitesse, accélération) dans la vie courante

théories naïves

pertinentes dans la vie quotidienne

familiarisation difficile avec

– concepts peu clairs au début

(masse, point matériel, force, énergie, potentiel. . .)

– outils mathématiques et technicité élevée

(vecteurs, calcul différentiel et intégral)

*Une spécificité de la mécaQ ? Non : un effet de perspective*

# les stratégies didactiques :

que faire des conceptions ?

## 3 types de stratégies didactiques

choix

la conception vue comme un obstacle épistémologique :

\*



à contourner en la niant  
*arrêtez de vous poser des questions !*

\*



à éliminer en la réfutant  
*oubliez tout ce que vous saviez !*

\*



à dépasser en faisant avec pour aller contre  
*plus compliqué que ce que vous pensiez !*

*pour enseigner, il faut choisir*

## les stratégies didactiques :

choisir une stratégie, c'est privilégier une représentation

### 3 types de stratégies didactiques

représentations privilégiées : la conception vue comme un obstacle épistémologique :

procédurales ▷ à contourner en la niant  
*arrêtez de vous poser des questions !*

conceptuelles ▷ à éliminer en la réfutant  
*oubliez tout ce que vous saviez !*

imaginées ▷ à dépasser en faisant avec pour aller contre  
*plus compliqué que ce que vous pensiez !*

*pour enseigner, il faut choisir*

# les représentations mentales :

## typologie

### 3 types de stratégies didactiques

représentations  
de type :

ce qui est privilégié :

- |               |   |  |
|---------------|---|--|
| procédurales  | ▷ | calculs effectués dans le cadre de la théorie axiomatisée ( $\Psi$ ) |
| conceptuelles | ▷ | abstractions<br>( <i>état quantique, quanton...</i> )                |
| imagées       | ▷ | images mentales<br>( <i>onde, particule...</i> )                     |

*intuition = se passer du procédural*

## A) la stratégie "shut up and calculate" :

Une épistémologie sans ontologie ni causalité

Trouver  $\Psi$  avant la mesure

$$i \hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + V \Psi$$

Potentiel  $V$ , conditions aux limites.

Superposition  $\Psi = \sum c_k \Phi_k$

Effondrement lors de la mesure

Avant :  $\Psi = \sum c_k \Phi_k$  où

$$\hat{A} \Phi_k = a_k \Phi_k$$

Après :  $\Psi = \Phi_m$

Utilisation de  $\Psi$

$|c_k|^2$  est la probabilité que la mesure donne  $a_k$

$\Psi$  est un ensemble de possibles

le réel est indéterminé avant la mesure (pas d'ontologie)

$\Psi$  se réduit à un unique possible

Le processus est aléatoire (non causal)

$\Psi$  outil de prédiction

Physique = simple épistémologie

Introduction : comment se représenter l'électron ?

Un jeu pour lister les différentes visions de l'électron

Quelques notions de didactique pour organiser tout ça

Des stratégies didactiques pour enseigner la mécanique quantique

Conclusion : que faire ?

Shut up and calculate : représentations procédurales

Le nuage électronique : représentations conceptuelles

La complémentarité bohrnienne : représentations conceptuelles

L'onde pilote : représentations imagées

## A) la stratégie "shut up and calculate" :

On peut se satisfaire de représentations procédurales



« Il n'y a aucun flou dans la démarche à suivre [...] avec les outils de la mécanique quantique ; ils ne souffrent pas d'ambiguïté, chacun peut suivre l'intégralité du chemin conduisant des premiers principes jusqu'aux prédictions »



« on invite les élèves à partager notre ignorance en les plongeant dans un état de cécité totale du monde physique où le bon sens perd son statut de juge suprême. Dans ces ténèbres, un seul fil d'Ariane salvateur : les mathématiques »

*la conception comme obstacle à contourner en la niant*

Introduction : comment se représenter l'électron ?

Un jeu pour lister les différentes visions de l'électron

Quelques notions de didactique pour organiser tout ça

Des stratégies didactiques pour enseigner la mécanique quantique

Conclusion : que faire ?

Shut up and calculate : représentations procédurales

Le nuage électronique : représentations conceptuelles

La complémentarité bohrnienne : représentations conceptuelles

L'onde pilote : représentations imagées

## A) la stratégie "shut up and calculate" :

On peut trouver insuffisantes les représentations procédurales



« La meilleure approche pour pénétrer dans le monde quantique consiste [à] se forger des images simples [...] Bien sûr, il faudra aussi résoudre des équations, mais il faut "faire parler" ces équations, saisir les idées qu'elles renferment »



« Certains physiciens acceptent [...] de renoncer aux images, mais d'autres, dont je suis, ont besoin de visualiser les phénomènes pour guider leur intuition, avant de passer au calcul »

Comment les étudiants s'approprient-ils le modèle quantique de la liaison chimique ?

Alain Dumon-Herry-Sauvalle  
Université de Bourgogne

« La visualisation de ces concepts par des schématisations [...] concrètes devrait grandement favoriser leur appropriation »



Introduction : comment se représenter l'électron ?

Un jeu pour lister les différentes visions de l'électron

Quelques notions de didactique pour organiser tout ça

Des stratégies didactiques pour enseigner la mécanique quantique

Conclusion : que faire ?

Shut up and calculate : représentations procédurales

Le nuage électronique : représentations conceptuelles

La complémentarité bohrnienne : représentations conceptuelles

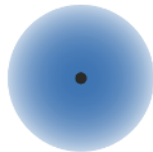
L'onde pilote : représentations imagées

## B) la stratégie du nuage électronique :

substituer l'onde à la particule



« des densités électriques provenant des diverses charges ponctuelles du modèle classique [...] chaque "individu" peut être distribué sur tout l'espace, de façon que les individus s'entre-pénètrent. »  $\rho = -e |\Psi|^2$



Nuage électronique

chargé  $\ominus$

$10^{-10}$  m

*la conception comme obstacle à éliminer en la réfutant*

Introduction : comment se représenter l'électron ?

Un jeu pour lister les différentes visions de l'électron

Quelques notions de didactique pour organiser tout ça

Des stratégies didactiques pour enseigner la mécanique quantique

Conclusion : que faire ?

Shut up and calculate : représentations procédurales

Le nuage électronique : représentations conceptuelles

La complémentarité bohrienne : représentations conceptuelles

L'onde pilote : représentations imagées

## B) la stratégie du nuage électronique : critiquable



« son idée [celle de Schrödinger], que ces ondes constituent l'essence même de la matière, que les particules ne sont que des paquets d'ondes, n'est pas seulement en contradiction avec les principes de la théorie de Bohr, si bien fondée, mais elle conduit aussi à des conséquences impossibles »

Introduction : comment se représenter l'électron ?

Un jeu pour lister les différentes visions de l'électron

Quelques notions de didactique pour organiser tout ça

Des stratégies didactiques pour enseigner la mécanique quantique

Conclusion : que faire ?

Shut up and calculate : représentations procédurales

Le nuage électronique : représentations conceptuelles

La complémentarité bohrnienne : représentations conceptuelles

L'onde pilote : représentations imagées

## C) la stratégie de la complémentarité :

une allégorie



« De quoi dépendons-nous, finalement, nous autres êtres humains ? De nos mots. Nous flottons dans le langage. »



« langage allégorique » : des éléments concrets correspondant à un contenu abstrait et complexe.

Divers points de vue qui :

- se complètent,
- sont insuffisants seuls,
- sont incohérents entre eux.

Introduction : comment se représenter l'électron ?

Un jeu pour lister les différentes visions de l'électron

Quelques notions de didactique pour organiser tout ça

Des stratégies didactiques pour enseigner la mécanique quantique

Conclusion : que faire ?

Shut up and calculate : représentations procédurales

Le nuage électronique : représentations conceptuelles

La complémentarité bohrienne : représentations conceptuelles

L'onde pilote : représentations imagées

## C) la stratégie de la complémentarité :

ni onde ni corpuscule



« Nous devons abandonner l'idée que [les électrons] ont une dualité d'essence, à la fois ondes et corpuscules (ce qui est logiquement absurde puisque les deux concepts s'excluent). »



L'électron « ne se comporte donc réellement ni comme l'une ni comme l'autre [...] il n'est ni l'une ni l'autre »

Introduction : comment se représenter l'électron ?

Un jeu pour lister les différentes visions de l'électron

Quelques notions de didactique pour organiser tout ça

Des stratégies didactiques pour enseigner la mécanique quantique

Conclusion : que faire ?

Shut up and calculate : représentations procédurales

Le nuage électronique : représentations conceptuelles

La complémentarité bohrienne : représentations conceptuelles

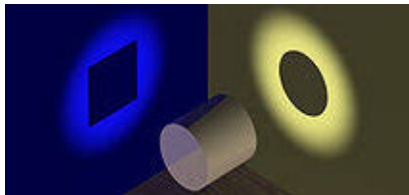
L'onde pilote : représentations imagées

## C) la stratégie de la complémentarité :

créer un nouveau concept (le quanton)



« Nous avons affaire à d'autres objets, proprement quantiques. [...] Ces quantons se comportent de façon spécifique »



*la conception comme obstacle à éliminer en la réfutant*

Introduction : comment se représenter l'électron ?

Un jeu pour lister les différentes visions de l'électron

Quelques notions de didactique pour organiser tout ça

Des stratégies didactiques pour enseigner la mécanique quantique

Conclusion : que faire ?

Shut up and calculate : représentations procédurales

Le nuage électronique : représentations conceptuelles

La complémentarité bohrienne : représentations conceptuelles

L'onde pilote : représentations imagées

## D) la stratégie de l'onde pilote :

onde et corpuscule



« L'onde  $\Psi$  apparaît [...] à la fois comme une onde pilote [...] et comme une onde de probabilité. Puisque le mouvement du corpuscule nous paraît rigoureusement déterminé [...], il ne nous semble pas qu'il y ait lieu de renoncer à croire au déterminisme des phénomènes physiques »



la théorie de l'onde pilote « conduit exactement aux mêmes résultats que l'interprétation habituelle. Néanmoins, elle permet une description précise et continue de tous les processus, même au niveau quantique. »

Introduction : comment se représenter l'électron ?

Un jeu pour lister les différentes visions de l'électron

Quelques notions de didactique pour organiser tout ça

Des stratégies didactiques pour enseigner la mécanique quantique

Conclusion : que faire ?

Shut up and calculate : représentations procédurales

Le nuage électronique : représentations conceptuelles

La complémentarité bohrienne : représentations conceptuelles

L'onde pilote : représentations imagées

## D) la stratégie de l'onde pilote :

les trajectoires bohmiennes



une particule « est pilotée par la fonction d'onde [...] mais garde à tout instant une position parfaitement définie, fonction de sa position initiale »

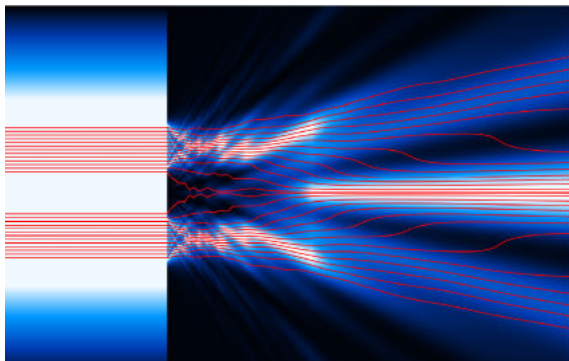
$$\underline{\Psi} = R \exp\left(i\frac{S}{\hbar}\right)$$

$$\rho = R^2$$

$$\vec{v} = \frac{\vec{\text{grad}}(S)}{m}$$

$$m\vec{a} = -\vec{\text{grad}}(V) - \vec{\text{grad}}(Q)$$

$$Q = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta(R)}{R}$$



Introduction : comment se représenter l'électron ?

Un jeu pour lister les différentes visions de l'électron

Quelques notions de didactique pour organiser tout ça

Des stratégies didactiques pour enseigner la mécanique quantique

Conclusion : que faire ?

Shut up and calculate : représentations procédurales

Le nuage électronique : représentations conceptuelles

La complémentarité bohrienne : représentations conceptuelles

L'onde pilote : représentations imagées

## D) la stratégie de l'onde pilote : l'électron dans l'atome



$$V(r) = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$\psi_{1,s}(r) = C \exp\left(-\frac{r}{r_0}\right) \exp\left(-i\frac{(-E_0)t}{\hbar}\right)$$

$$r_0 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{me^2} \quad \text{ct} \quad E_0 = \frac{me^4}{32\pi^2\epsilon_0^2\hbar^2}$$



« dans l'état fondamental de l'atome d'hydrogène l'électron et le proton, tout électrisés qu'ils soient, restent effectivement immobiles, "à se regarder en chiens de faïence" »

$$S = \hbar \left( \arg(C) + \frac{E_0 t}{\hbar} \right)$$

$$\text{donc } \vec{v} = \vec{0}$$

$$R = |C| \exp\left(-\frac{r}{r_0}\right)$$

$$Q = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{2r_0} \right)$$


$$-E_0 = E_c + Q + V$$






# Retour sur le jeu "qui veut gagner des quantons?"


## 4 stratégies didactiques et leurs représentations mentales

A :  procédure  
shut up and calculate  
prédiction sans ontologie



$|\Psi|^2$  = densité de probabilité  
de *détecter* l'électron

B :  concept  
le nuage électronique  
 $e^- =$  onde

$|\Psi|^2$  = densité  
de l'électron *lui-même*

C :  concept  
complémentarité  
 $e^- =$  quanton

$|\Psi|^2$  = densité de probabilité  
de *détecter* l'électron

D :   image  
dualité onde et particule  
 $e^- =$  particule guidée par  $\Psi$

$|\Psi|^2$  = densité de probabilité  
de *présence* de l'électron

4 stratégies didactiques équivalentes du point de vue scientifique

# Une possibilité didactique peu exploitée

## La théorie de l'onde pilote



« J'étais indigné de ne pas avoir été informé plus tôt de l'image de l'onde pilote. Et je suis indigné que même maintenant, la plupart des étudiants n'en soient pas informés du tout. »

John Bell

in *Louis de Broglie que nous avons connu* (1988)