

# **Lecture systémique du quantique**

Michel Dureigne

Exposé groupe modélisation quantique AFSCET Nov 2020

# Introduction

La physique quantique est caractérisée par une multiplicité de points de vue.

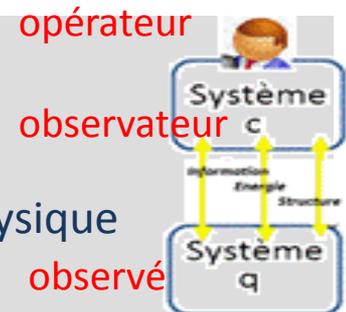
Elle est à la fois rigoureuse au plan mathématique et foisonnante en ce qui concerne les formalismes, les concepts, et les notes explicatives.

L'exposé propose d'appliquer une méthode d'ingénierie système pour aborder cet univers complexe.

Cette méthode semble bien adaptée à la modélisation promue par l'école de Copenhague. En effet cette modélisation privilégie une approche par la mesure, c'est-à-dire par l'information

Le concept systémique part de l'hypothèse que:  
toute expérience quantique se structure en trois couches :

**information utilisateur**, système de **mesure observateur** qui relève de la physique classique, et système **quantique observé** qui est une boîte noire.



# Contexte

- Origine du besoin
  - complexité du contenu d'internet consulté après chaque exposé de notre groupe de travail « quantique »
- Procédé pour y répondre
  - application d'une technique d'ingénierie système
- Produit en devenir
  - Document première ébauche en Décembre 2019      actuel V6  
choix d'une vision empirique et axiomatique, bien que le cours de \*Landau soit une bible
- Précision sur l'auteur
  - "niveau quantique " : chapitre cours électronique à Supélec en 68  
algèbre vectoriel du taupin 64-67
    - \*Mécanique quantique de Landau achetée en 69  
librairie du Globe, prix d'un ticket de restau U, plusieurs fois entrouvert avant 2019
  - "profil scientifique : automatisation de l'ingénierie d'Airbus; analyse système

# Analyse trifonctionnelle

L'analyse trifonctionnelle est une analyse organisationnelle des sociétés indo européennes proposée par G Dumézil.

Par extension, cette analyse holistique consiste à observer un "objet" d'un discours sous trois points de vue différents. Cet objet unitaire "boite noire" est alors "ouvert" ("boite blanche") sans pour autant perdre son unité puisqu'il ne s'agit que de vues.



Elle se distingue de la culture orientale de l'harmonie et sa complémentarité des contraires le yin yang



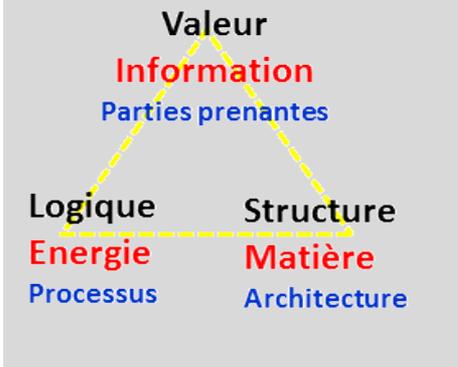
*Les positions relatives des concepts précisent leur signification*

Elle s'adapte bien à l'analyse des systèmes et de leurs sous-systèmes

- conceptuels valeur, logique, structure
- physiques
- projet

A tout niveau d'analyse des **connaissances**, elle peut être utilisée comme un microscope systémique.

Ici largement utilisée pour **organiser** les diapositives



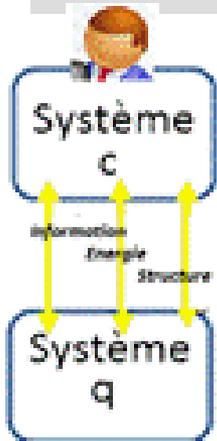
Voir exposé fait au groupe de travail AFSCET modélisation de systèmes complexes  
[Res-Systemica, volume 12, novembre 2014]

# Cadrage: **Mission** du système considéré

La physique quantique est une réponse à des résultats expérimentaux non conformes aux prédictions de la physique classique ou relativiste. Son champ expérimental est le monde subatomique.

La *mission* du système considéré est **d'améliorer la connaissance** de l'ingénieur bien au fait de la physique classique et qui cherche à comprendre la dimension originale de la physique quantique.

L'idée est d'utiliser le **concept de système expérimental sur son cycle de vie** pour "maquetter" la physique quantique.



Montage expérimental à trois niveaux :

- **humain** par essence subjectif,
- **système observateur** aussi "objectif que possible", conçu en **physique classique**
- **système observé** subatomique traité en **boite noire**

→ **Simulé**

*Ecole de Copenhague*

# Cadrage: **Ressources** cognitives

La gestion évolutive des connaissances constitue la dynamique du projet.

Document actuel en V6

Annexes du document ([anciens chapitres convertis en ressources](#))

prérequis :	A 1 Mécanique de <b>Hamilton</b> en électrostatique , spin, quaternions A2 Ondes (scalaires) et vibrations <b>harmoniques sphériques</b> A3 <b>Champs</b> (vectoriels) électromagnétique , polarisation, moment magnétique
modules analyse	B1 mécanique quantique : fonction de De Broglie , équation de Schrödinger B 2 Atome d'hydrogène : le cas qui valide l'équation de Schrödinger B 3 Moment magnétique quantique de spin et d'orbitale C1 Etats quantiques et postulats quantiques C2 Information quantique et intrication

Liste de références internet qui évolue

La Bible [en backup de mon approche empirique](#) Mécanique quantique de Landau

# Cadrage: Ingénierie du système d'expérimentation

## Valeur du système

critère subjectif d'amélioration de la connaissance basé sur les versions  
+++ entre version 1 et version 6 à **iso cadrage** et sans trop changer les cas d'usage  
d'autres itérations sont prévisibles

## Processus de production de valeur

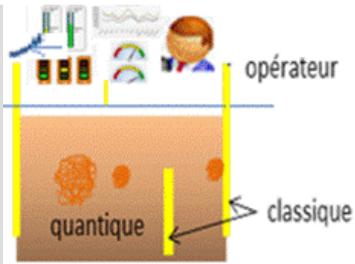
Itération du cycle de vie du système d'expérimentation V1 → V6

## Architecture globale

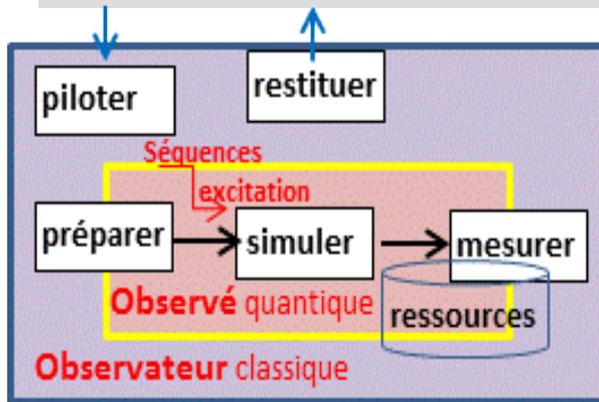
physique, fonctionnelle et de valeur

La vue architecture se prête aux représentations schématiques,  
et donc à une compréhension visuelle de l'aspect organisationnel d'un système  
*un bon schéma vaut mieux qu'un long discours.*

# Cadrage: Ingénierie du système d'expérimentation

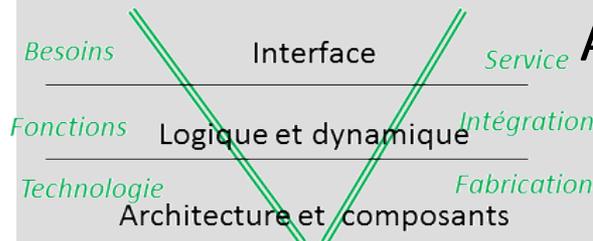


- Architecture physique: la partition entre
- humain: tableau de bord évènementiel et statistique
  - observateur: effecteurs, capteurs, structure de noyaux
  - observé : particules (électrons, photons) et vide quantiques



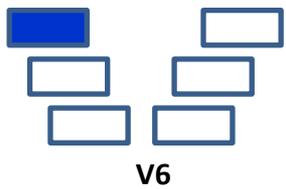
## Architecture fonctionnelle

- traitement information
  - mise à l'échelle, transfert énergie
  - fonction boîte noire à simuler en design et interprétation
- Impact structurel  
Changement interne



## Architecture de la valeur: modules du cycle de vie

- Modules de création de connaissances
- besoin et service (validation des besoins)
  - fonction "théorie mathématique" Intégration "viabilité physique"
  - architecture objets et interfaces Composants implémentation

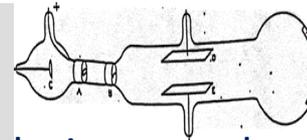


# Cas d'usage

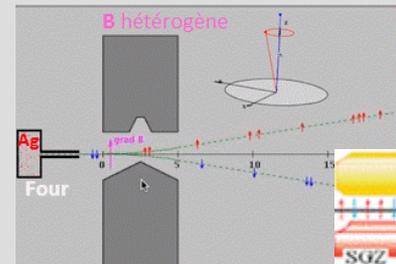
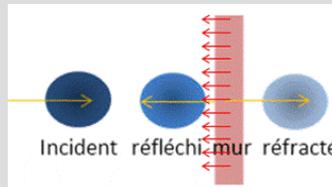
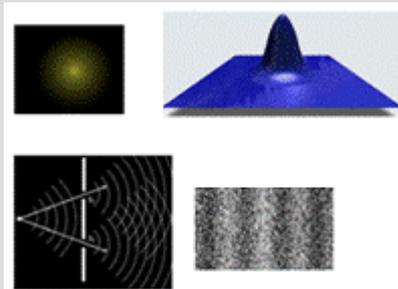
Les cas d'usage sont un moyen pratique de présenter les besoins en partant de propositions de services attendus de systèmes complexes ou de systèmes.  
Ici comprendre l'écart entre observé quantique et macroscopique classique

## Particule libre "position"

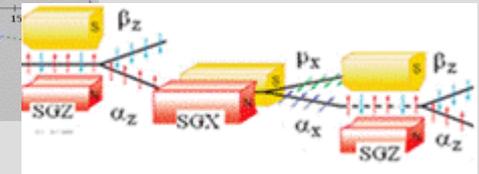
prédiction classique: impact concentré en ligne droite, ou rebond



Canon/tube à vide



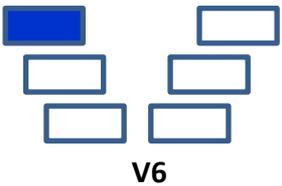
Particule aimant



En basse énergie: statistiquement un **corpuscule**, ou une **onde** diffractable  
En haute énergie : un corpuscule

Déviations haut/bas par un champ B direction probabiliste  
deux points d'impact symétriques

évolution culturelle : rayon/particule de Descartes → Onde de Fresnel → photon d'Einstein  
courant/onde électrique → électron → ondulatoire

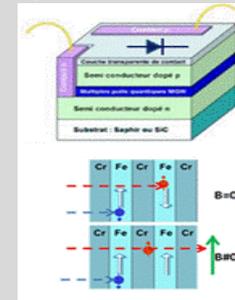
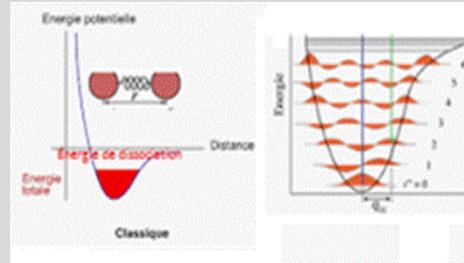
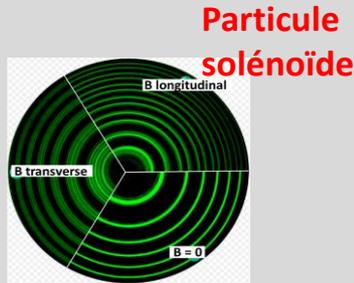
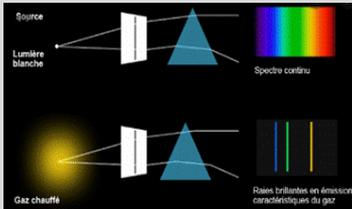


# Cas d'usage

## Particule piégée "énergie vibratoire"

évolution culturelle : variation d'énergie continue

atome insécable → spectre continu → spectre discret → atome de Bohr → spectre harmonique (Zeeman)



**En physique classique  
Un cristal conduit ou isole**

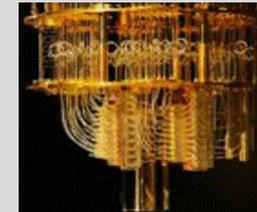
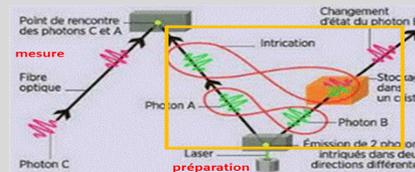
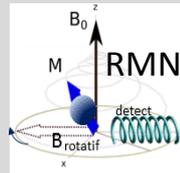
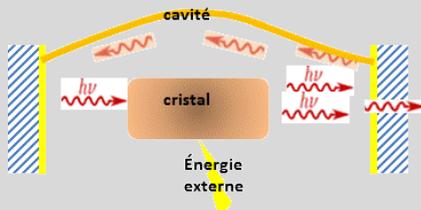
Spectre discret et harmonique dédoublé sous effet magnétique

Oscillateur harmonique l'illustration devinette

Semi conduction excitation électrique ou magnétique

## Particule gouvernée "information maîtrisable"

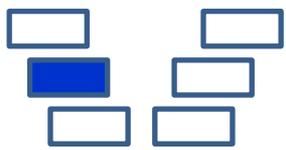
évolution culturelle : échelle trop petite → incertitude → information binaire probabiliste



Production de masse de particules identiques et superposées

Téléportation quantique "instantanée"

Processeur quantique programmes "probabiliste"



# Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle se limite ici au bloc boîte noire, "simuler" qui est fonctionnellement innovant (non accessible à la physique classique)

L'analyse fonctionnelle est le moment où l'ingénieur exprime sous forme de modèles mathématiques le comportement du système. Donc ici les mathématiques du quantique

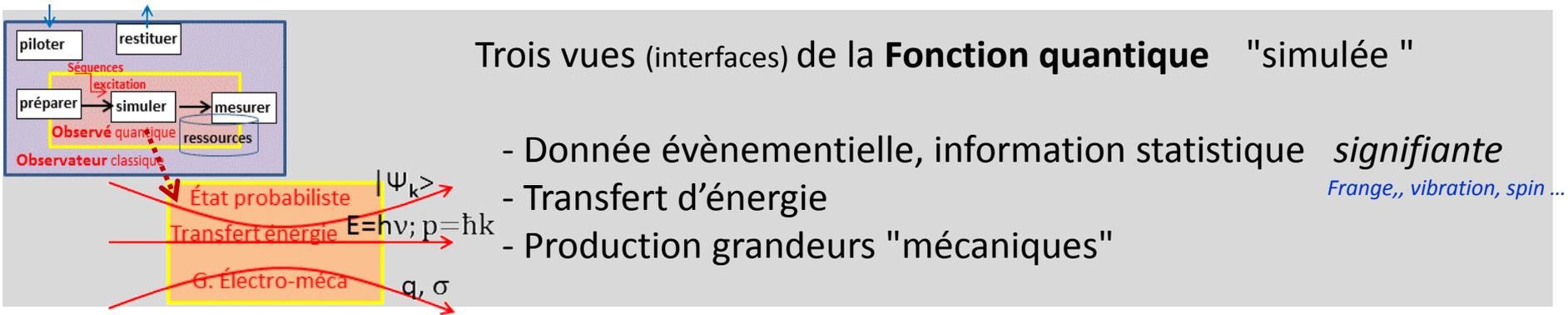
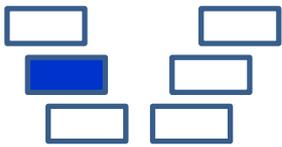


Table des analyses fonctionnelles

Base physique	système	dynamique	note
électrostatique	Charge	Trajectoire	Une diapo par vue Physique quantique 1ère génération
électrodynamique	Spin	Précession	spin-orbite omis couplage système spin et système charge
signal	Qbit	Probabiliste	Pilotage séquentiel



# Analyse fonctionnelle

## Modèles de compréhension

**Mécanique de Hamilton**

Trajectoires:  
Position  $q$   
Impulsion  $p$   
Moment  $L=q^{\wedge}p$  et  $\sigma$

Système **Charge**

**Précession et contrôle gyroscopique  $\sigma_{xyz}$**

$\sigma$  va de  $+0z$  à  $-0z$  si  
 $\theta: 0 \rightarrow \Pi$  et  $\phi: 0 \rightarrow 2\Pi$

Vibration/résonance à  $\sigma_y$  fréquence de rotation

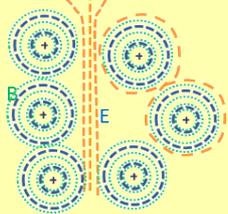
Système **Spin**

**Vecteur d'état statistique et projections base  $2^n$**

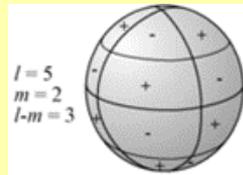
Système **Qbits**

3 vues contradictoires de la mécanique quantique

N'existe pas en physique classique



Modèle planétaire d'une **particule** statistique orbite; valence en 8; libre déviée conservation de H, et L (Képler)

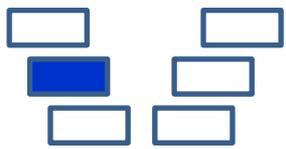


**Ondes** stationnaires et interférences analogie du Jeu de cordes ou de sphères énergie du fondamental champ E **vibration** harmonique champ B



**Spectre** de valeurs **évènement aléatoire** synthèse par statistique

**Énergie=Vue principale pour la mesure**



# Analyse fonctionnelle **Charge**

## vue énergie

Classique: **transfert d'énergie** (rayons et ondes)

lois de nature optimisent la dépense d'énergie par le principe de moindre action  $S$

Onde et transfert d'énergie :  $\Psi = \Psi^0 \exp i(kx - \omega t)$  énergie  $E = |\Psi(x, t)|^2$

Quantique:

Rayonnement quantifié du corps noir  $\rightarrow$  photon et relation  $E = h\nu$  [ $\hbar$  cte de Planck]

Hypothèse **De Broglie** :  $\Psi(x, t) = \Psi^0 \exp(i S/\hbar)$  action  $S$  dans la phase d'une **onde matière** avec  $S = \mathbf{p}\mathbf{x} - Et$  et équivalence  $\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}$ ,  $E = h\nu = \hbar\omega$  et  $\hbar = h/2\pi$   $p$  impulsion  $k$  facteur d'onde

**L'information mécanique  $S$  est contenue dans la phase**

Classique: **énergie vibratoire**

loi de d'Alembert  $\nabla^2 \Psi = -1/c^2 \partial^2 \Psi / \partial t^2$  ;

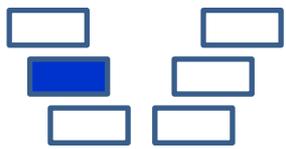
vibratoire : équation spatiale **de Helmholtz**  $\nabla^2 A(\mathbf{x}) = -A(\mathbf{x})m^2$ , où  $\Psi(x, t) = A(x)D(t)$  avec solutions "harmoniques" : couples  $(A, m)$  ;  $A$  = **fonction propre**,  $m$  = **valeur propre** ;  $m$  proportionnel à un nombre entier  $n$  ;  $n$  = numéro d'harmonique ;  $n$  est non borné.

Quantique:

**équation spatiale de Schrödinger**  $\hat{H} \Psi(\mathbf{x}) = E \Psi(\mathbf{x})$  analogue Helmholtz étendue en  $\hat{H} = a \nabla^2 + b$  et choisissant pour le nombre quelconque  $k^2$  la valeur  $E$  de l'énergie totale.

$\rightarrow$  solution harmonique : **spectres** de fonctions et valeurs propres  $\{\dots \Psi_k \dots\}$  et  $\{\dots E_k \dots\}$

**↑**  
**quantification**



# Analyse fonctionnelle **Charge**

## vue mécanique

Classique: prédiction d' **évolution temporelle** de **q position** au temps **t**

impulsion  $\mathbf{p} = m \mathbf{dq}/dt$  ; énergie cinétique  $K = \mathbf{p}^2/2m$  énergie totale  $H(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = K + V(\mathbf{q}) = E$

Quantique: prédiction de **densité spatiale** de **q position** au temps **t**

sous l'hypothèse De Broglie :  $\Psi(\mathbf{q}, t) = \Psi^0 \exp(i(\mathbf{p}\mathbf{q} - Et/\hbar))$   $\mathbf{q}$  position *possible* au temps  $t$

en dérivant :  $i\hbar \partial/\partial t \Psi = E \Psi$  ;  $-i\hbar \nabla \Psi = \mathbf{p} \Psi \rightarrow -\hbar^2 \nabla^2/2m \Psi = K \Psi \rightarrow (-\hbar^2 \nabla^2/2m + V)\Psi = E \Psi$

Postulats de Schrödinger :  $\hat{H} \Psi = i\hbar \partial/\partial t \Psi = E \Psi$  et  $\mathbf{P} \Psi = \mathbf{p} \Psi$

avec opérateurs impulsion  $\mathbf{P} = -i\hbar \nabla$ , et Hamiltonien  $\hat{H} = \mathbf{P}^2/2m + V$

**L'information mécanique est dans le couple impulsion Hamiltonien**

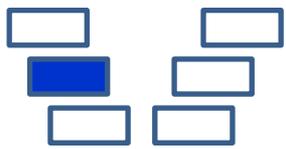
Par cohérence avec vue énergie:  $\hat{H} \Psi_k = E_k \Psi_k$  et  $\mathbf{P} \Psi_k = \mathbf{p}_k \Psi_k$  **Valeurs mécaniques observables** spectres fonctions et valeurs propres

Plus spécifiquement la vue mécanique traduit une **incertitude spatiale sur la mesure** de position au temps  $t$ , et que l'on peut modéliser par un gradient  $-i\hbar \nabla$  et l'équation :  $\hat{H} \Psi = E \Psi$   
 $|\Psi(\mathbf{q}, t)|^2$  *normalisé sur tout l'espace* exprime une probabilité de présence au point  $\mathbf{q}$  et au temps  $t$

L'opérateur gradient  $\mathbf{P} = -i\hbar \nabla$ , est complété par un rotationnel  $\mathbf{L} = -i\hbar \mathbf{Q} \wedge \nabla$ ,

(vecteur polaire  $\mathbf{p}$  et vecteur axial  $\mathbf{L}$  ont pour correspondants des opérateurs symétriques et antisymétrique)

**Correspondance** grandeurs mécaniques  $\rightarrow$  opérateurs spatiaux ou scalaires de même nom.



# Analyse fonctionnelle **Charge**

## vue information

L'état d'un système à un instant  $t$  est donné par un tableau de valeurs de grandeurs  $G$  observées (q position, p impulsion, E énergie totale ...)

La mesure quantique distingue le temps statistique du temps évènementiel.

statistique → résultat signifiant pour la physique classique.

évènementiel → valeurs probabilistes quantifiées (spectre de mesure).

Le modèle quantique **simulé** distingue : un état statistique et des états évènementiels  $|\Psi_k\rangle$  via un espace vectoriel de Hilbert  $\mathcal{H}$  :  $|\Psi\rangle = \sum a_k |\Psi_k\rangle$ ,  $\sum a_k^2 = 1$ , et  $k=1, n$ .

$|\Psi_k\rangle$  base de vecteurs d'état unitaires ;  $a_k$  complexes.  $|\Psi\rangle$  vecteur d'état quantique (probabiliste).

Et l'opérateur observable\* de  $G$ ,  $G|\Psi\rangle = \sum a_k g_k |\Psi_k\rangle$  de spectre de mesure  $\{\dots g_k \dots\}$

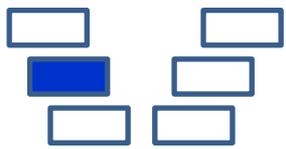
Les  $g_k$  et  $|\Psi_k\rangle$  sont respectivement valeurs propres et vecteurs propres de  $G$ .

En cohérence avec la vue énergie où  $\hat{H} \Psi_k = E_k \Psi_k \rightarrow a_k =$  fonction propre  $\Psi_k$  normalisée

**Statistique** grandeur classique de référence → évènementiel par principe de correspondance  
création espace Hilbert  $\mathcal{H}$  du système

**Evènementiel** opérateur quantique → statistique par principe de réduction  
réduction/destruction espace de  $\mathcal{H}$

\*  $G$  Opérateur observable algébrique dim  $n \times n$  #  $G$  Opérateur différentiel ou scalaire



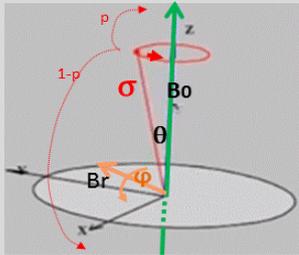
# Analyse fonctionnelle : spin

Système (particule en translation) spin : 2 états, énergie d'un dipôle, gyroskopique/précession

Mesure statistique retourne les états probabilistes 0 ou 1 :  $|\Psi\rangle = \cos \gamma |0\rangle + \sin \gamma |1\rangle$   $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$   $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$   
 $|0\rangle$   $|1\rangle$

Energie magnétique potentielle  $\Delta E_m = \mu\sigma \cdot B$  est proportionnelle à l'induction externe B  
 → l'énergie est quantifiée par 2 valeurs propres +/-  $m_s$  liées à la projection scalaire de  $\sigma$

Pauli : le champ scalaire  $\Psi$  de la charge, devient 2D pour intégrer +/-  $m_s$  du spin :  $\hat{H} |\Psi\rangle = E |\Psi\rangle$   $|\Psi\rangle = \begin{bmatrix} \psi_+ \\ \psi_- \end{bmatrix}$   
 charge scalaire; spin vecteur 2D | $\Psi\rangle$  fonction propre



Couple  $\mu\sigma \wedge B$  engendre précession statistique entre vecteurs opposés  $\uparrow$  et  $\downarrow$   
 ( $\theta = 0, \varphi = 0; \rightarrow \theta = \pi, \varphi = 2\pi$ ) et en événementiel une probabilité  $p$  d'angle  $\theta$  sur ces positions up, down  $|\Psi\rangle = \cos\theta/2 |\uparrow\rangle + \sin\theta/2 \exp(i\varphi) |\downarrow\rangle$

$\sigma$  = moment unitaire électron sans inertie

L'angle  $\theta$  est modifié par champ tournant  $B_r$  ou excitation fréquentielle résonance sur vitesse de spin  $\omega_s$ . C'est un concept de **pilotage niveau statistique du vecteur d'état**

Grandeurs quantifiées de moment cinétique ( $\sigma, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ) → 4 opérateurs ( $S, S_x, S_y, S_z$ ) par principe de correspondance. En particulier  $S_z |\Psi\rangle = m_s |\Psi\rangle$ .

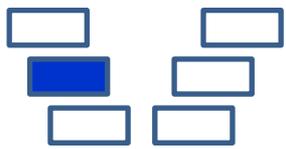
Analogie du moment orbital où  $L_z = -i\hbar \partial/\partial \varphi$ , ici  $S_z = i\hbar \partial/\partial \varphi P_z$ ,  $P_z$  matrice de Pauli 2D liée à  $\Psi$  2D

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Pauli  $P_z$

La valeur  $m_s$  est un nombre quantique de l'électron orbital, les 3 autres pour la charge.  
 Distinguer l'énergie magnétique de spin, de la variation du courant orbital par induction (Spin-orbite)

Ici trois sens pour le Dirac  $|\Psi\rangle$  : état  $|0\rangle$ , fonction  $|\Psi_+\rangle$ , moment cinétique  $|\uparrow\rangle$



# Analyse fonctionnelle : Qbit

La mission du système Qbit est de gouverner un vecteur binaire  $2^n$  probabiliste, là où un système informatique classique gouverne du binaire déterministe

**Qbit = une modélisation système** de la **vue informationnelle** d'un système q. à 2 états  
 $|\Psi\rangle = \sum a_k |\Psi_k\rangle, \sum a_k^2 = 1, \text{ et } k=1, 2$   
 registre de Qbits = système à n Qbits obtenu par "intégration quantique"

Fonction structurelle : produit tensoriel

1 Qbit :  $\mathcal{H} 2^1D$  vecteur d'état probabiliste  $|\Psi\rangle = a_1 |0\rangle + a_2 |1\rangle$

2 Qbits:  $\mathcal{H} 2^2D$   $\mathcal{H} \otimes \mathcal{H}'$   $|\Psi\rangle = c_1 |00\rangle + c_2 |01\rangle + c_3 |10\rangle + c_4 |11\rangle$

$c_1=(a_1 a'_1)/\rho, c_2=(a_1 a'_2)/\rho...$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$|0\rangle \quad |1\rangle$

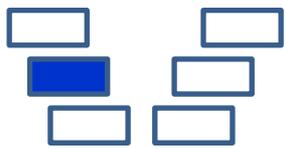
Fonction dynamique: modification unitaire des  $a_1$  qui se propage à  $a_2$  et tous les  $c_k$   
 pour assurer  $\sum |a_k|^2 = 1$  et  $\sum |c_k|^2 = 1$  modif= excitation non réactive :  $\mathcal{H}$  inchangé

Fonction pilotage de valeur: enchainement séquentiel de modif. unitaires  
 mesure événementielle en fin de séquence

itération de séquences et évaluation statistique

Le pilotage par précession de spin est un mouvement temporel de nature statistique, par correspondance c'est une opération spatiale/atemporelle au niveau quantique, et le temps est remplacé par une séquence ordonnée d'opérations algébriques *idem pour photon polarisé*

note: 2 Qbits intriqués forment un sous espace irréductible de dim 4 avec  $c_1=c_4=0$  ;



# Synthèse fonctionnelle

La **fonction quantique** "boite noire" **est simulable** par un **procédé en trois phases** :

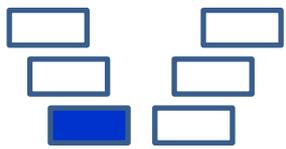
- **physique** : perception statistique → vision physique classique de dynamique temporelle.  
→ conversion, par **principe de correspondance** en opérateur spatiaux quantiques.
- **logique** : exploitation des opérateurs avec le moteur "équation de Schrödinger"  
 $\hat{H} \Psi = i\hbar \partial/\partial t \Psi$  ou des équivalences de plus haut niveau pour des cas plus complexes afin de déterminer des spectres de valeurs propres, au temps de mesure  $t$ .
- **sémantique** pour restituer l'information mesurée  $G|\Psi\rangle = \sum a_k g_k |\Psi_k\rangle$  en temps statistique  
 $\sum a_k |\Psi_k\rangle$  : vecteur d'état probabiliste (et non superposition d'états) ;  $|\Psi_k\rangle$  état évènementiel non sémantique obtenu par réduction de paquet;  $k$  entier fini ou infini; le sémantique est toujours statistique

Un **système quantique** est **configuré** par son **espace de Hilbert**. Des excitations externes peuvent : jusqu'à un certain seuil modifier en séquentiel les  $a_k$  sans changer la configuration, et au-delà provoquer des phénomènes de résonance qui vont affecter cette configuration

Si  $V(q)$  est constante, on a une onde de type De Broglie

Si  $V(q)$  est périodique comme dans les structures cristallines, on a une onde de Bloch qui est à la base de la théorie des bandes

L'extension à un système multi particules s'obtient en étendant  $\hat{H} = -\sum \hbar^2 \nabla^2 / 2m + V$ . Si les particules ne sont pas en interaction, la fonction probabiliste  $\Psi$  se factorise en  $\Psi(q_1, \dots, q_n, t) = \prod \Psi(q_i, t)$  ; il y a simple superposition des fonctions. Dans le cas contraire il y a intrication.



# Architecture

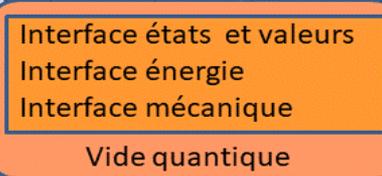
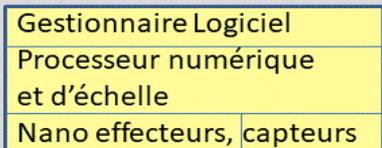
L'étude d'architecture correspond au découpage d'un système en sous systèmes puis composants dans lesquels seront implémentées les fonctions. Ce découpage est guidé par des choix technologiques.

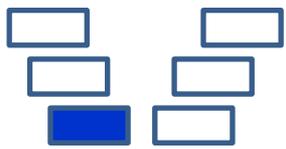
L'architecture globale retenue :

- couche **expérimentateur**, et gestionnaire de connaissances qui implémente les fonctions de service (c'est la mission du système)
- couche **observateur-physique** classique qui implémente les fonctions de pilotage et restitution, résout les facteurs d'échelle, interagit avec le système observé au travers de composants spécifiques (effecteurs, capteurs, enceinte à vide ...) et d'infrastructures cristallines
- couche **objet quantique** qui n'est connue qu'au travers d'interfaces. Le vide quantique découple l'observateur de l'observé

On associe

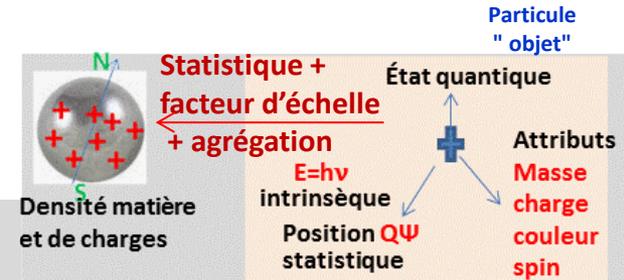
- **champ "cognitif" probabiliste** et **temps mémoriel** (niveau information mesure) ; opérateurs observables, "tirage" réduction du paquet d'onde à la mesure
- **champs d'interaction** et **temps physique/statistique** ici électromagnétisme (sources : charges électriques ; équation d'onde, opérateurs gradient E et rotationnel B ) mais aussi électronucléaire (sources : couleurs) et gravité(sources masse) ici négligés
- **champ quantique** et **temps évènementiel** ; équation Schrödinger, opérateurs impulsion et moment cinétique





# Architecture

## Architecture système quantique :



### vue mécanique

s'inscrit dans le Modèle Standard qui est une ontologie  
 particule simple : états ( $| \rangle$ ), méthodes (**observables**) attributs (**masse, charge, couleur, spin**) .  
 ex QΨ densité de position

particule composées règles d'agrégation pour Fermions → cohérence avec matière  
 de superposition pour Bosons → cohérence avec ondes

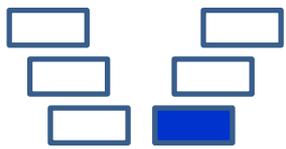
particules intriquées liens probabilistes hors de l'espace temps

### Vue énergie

interaction avec [**mesure destructive**] ou sans effet [**évolution de  $\mathcal{H}$** ] sur observateur  
 évolution interne : champ quantique et opérateurs  $\hat{H} \Psi = E \Psi$  ;  $E=hv$   
 cohérence quantique : dissipation énergie dans les vide

### Vue information

Structure algébrique et Espace de Hilbert du vecteur quantique



# Composants et configurations

En ingénierie système il s'agit de spécifier, acquérir puis assembler les composants qui formeront les configurations du système. Un assemblage devient un système dans la phase intégration

## Sources, capteurs, dispositifs intermédiaires

canon électrons + champ E gaz d'atomes neutres four + buse  
détecteurs par ionisation, effet photo sensible interféromètres  
fentes de Young des fils d'araignée métallisés. (100nm)

## matériaux et dispositifs d'excitation

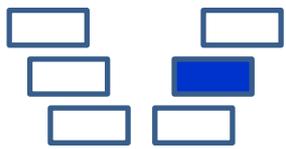
écart entre noyaux ordres longueur d'onde de De Broglie ;  
cavités résonantes d'interfaces de cristaux homogènes plus ou moins dopés  
excitation électromagnétiques ou thermiques ; champs pulsés pour résonance.

## Dispositifs de structuration quantique

tube à vide matériaux/optique non linéaires champs électro nucléaires  
dissociation de la matière, ou antiparticules, rupture de positrons)  
*lien entre photons intriqués et électrons/atomes intriqués à approfondir.*

**Qbit** = composant technologique qui implémente état binaire

spin up/down, atome niveau fondamental/excité , polarisation d'un photon gauche, droite



# Intégration vérification

L'intégration est la "mise en énergie", avec essais de vérification opérationnelle  
Les essais sont hiérarchisés par niveaux de sous systèmes, vérifient la bonne implémentation des fonctions et l'acceptabilité des phénomènes non désirés.

**intégration système observateur** *information* de l'expérimentateur.

- deux modules informatiques pilotage et restitution *orientés perception utilisateur*
- deux modules physique classique et facteur d'échelle: mesurer et préparer; préparation (*conditionnement et mise en conditions initiales*) reproductible à l'identique

**interface observateur-observé** *transferts d'énergie*

échange par quanta d'énergie avec maintien ou non de l'isolement du système quantique. Mesure destructive qui modifie la structure de Hilbert; apport non destructif (*pas de contre effet sur l'observateur*) qui modifie la distribution probabiliste

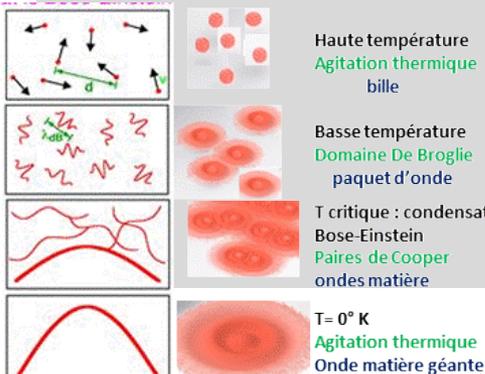
**interface milieu quantique** *infrastructure physique*

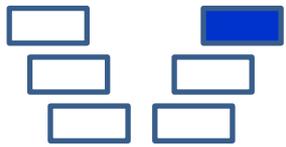
Conditionnement du système : crée l'espace de Hilbert.

Le système quantique par interaction lente avec le vide se déconditionne. (*décohérence*)

Dans notre cas il faut rester dans le domaines de De Broglie.

Pas d'autre effet qu'électromagnétisme (*masse trop faible pour gravité électronucléaire limité à cohérence des noyaux*)





# Services : modélisation des cas

Le terme **particule** s'applique à un **objet abstrait** qui n'est ni corpuscule ni onde.

La position **q** est une **valeur spatiale** et non un centre d'inertie. Seule **l'énergie est "réelle"**

## particule libre

Le processus de mesure pour une particule libre se traduit par un transfert ponctuel ( $q, t_m$ ) d'énergie du système quantique vers un capteur de type photoélectrique.

Le point transfert ( $q, t_m$ ) est probabiliste, l'interprétation du phénomène est statistique.

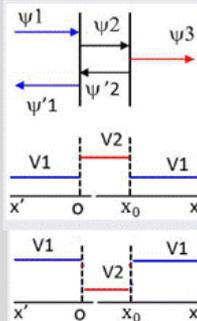
$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - V) \Psi = 0$$

$$\Psi_1(0) + \Psi_1'(0) = \Psi_2(0)$$

$$\left[ \frac{d\Psi_1}{dx} \right]_0 + \left[ \frac{d\Psi_1'}{dx} \right]_0 = \left[ \frac{d\Psi_2}{dx} \right]_0$$

aller à droite  $\Psi_1 \Psi_1^*$   
probabilité aller à gauche  $\Psi_1' \Psi_1'^*$

réflexion  $\frac{\Psi_1' \Psi_1'^*}{\Psi_1 \Psi_1^*}$



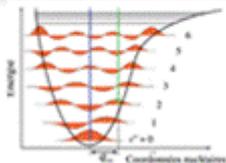
La fonction quantique  $\Psi(q,t)$  qui détermine la position probabiliste de la particule dépend des attributs (masse, charge) et de l'énergie initiale  $E$ , et du potentiel d'interaction  $V(q)$ . Ce sont des grandeurs mécaniques. Si  $V=cte$  la solution de Schrödinger est une onde de De Broglie.

La densité spatiale s'analyse aux frontières sans notion de temporalité, et pour des configurations différentes avec pour règle des conditions aux limites et des continuités /conservation de  $\Psi$  comme pour une onde optique.

## particule piégée

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - \frac{1}{2} k x^2) \Psi = 0$$

$$E = (n + \frac{1}{2}) \hbar \sqrt{\frac{k}{m}} = (n + \frac{1}{2}) \hbar \omega$$

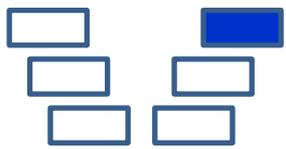


Le processus de mesure pour une particule piégée se traduit par une émission/absorption de photon en lien avec la "vibration" de la particule

Le modèle d'intérêt est un spectre de niveaux d'énergie.

Pour l'atome comme piège la solution est de type harmoniques sphériques

Pour le cristal comme piège (conduction/valence) il y a une périodicité spatiale de puits, et la solution est traitée par la théorie des bandes



# Services : modélisation des cas

## Gouverne quantique

La gouverne quantique est une **action directe** sur les **vecteurs d'état probabilistes** des particules d'un système, sous réserve que les règles de Pauli soient respectées.

### Amplification quantique:

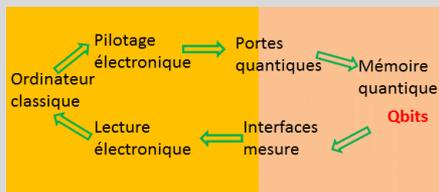
Des phénomènes indétectables au niveau procédé industriel deviennent tangibles : résonance laser (**empilage de photons identiques**) et magnétique (**empilage de moment magnétique de spin**) grâce à la superposition totale des vecteurs individuels. Pour le photon état  $(q, \sigma)$  ( $\sigma \rightarrow hv$  identiques) pour proton état  $(\sigma)$  ( $q$  interdit)

### Téléportation quantique:

L'intrication de deux photons produit le vecteur  $|\Psi\rangle = c_2 |01\rangle + c_3 |10\rangle$   $c_2^2 + c_3^2 = 1$   
Une mesure annule  $c_2$  ou  $c_3$ , et autonomise les photons avec polarisations opposées

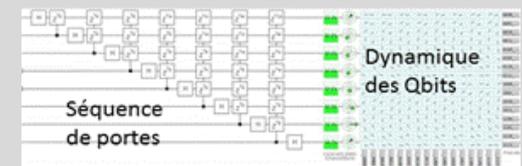
### Calcul quantique:

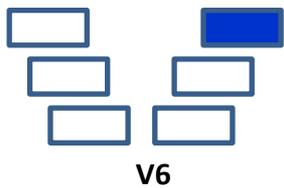
Le vecteur global d'un espace  $\mathcal{H}$  de dim.  $2^n$  subit une rotation séquence de calcul via des portes d'excitation; une mesure le projette sur un des axes binaires de  $\mathcal{H}$ ; par itération l'axe et donc le nombre binaire à plus fort coefficient probabiliste.



L'architecture est conforme à notre modèle fonctionnel en 3 couches

Le registre de Qbits est le système quantique, son vecteur est piloté par les portes.





# Services Synthèse

Pour un ingénieur système, le point clé à retenir est le mécanisme qui assure la boucle : utilisateur, dispositif classique, **boite noire quantique** et retour.

Ce mécanisme est basé sur deux postulats :

*descendant* principe de correspondance; et *ascendant* réduction du paquet d'onde.

et distingue deux temporalités

événementielle de collecte brute; et statistique d'interprétation sémantique

La boite noire est simulable par un système à trois vues

architecture globale

- informationnelle mettant en œuvre un vecteur quantique probabiliste → couche user
- énergétique dont le moteur est une équation de *champ quantique* → couche observateur
- structurelle ou modèle de donnée avec des relations entre des entités abstraites dites particules quantiques; et des méthodes dites opérateurs quantiques . → couche Q

La gouverne se fait par reconfiguration du système aux phases préparation et mesure, et rotations séquentielles du vecteur probabiliste quantique par excitation électromagnétique basse énergie.

Le cœur théorique est un espace vectoriel de Hilbert et opérations algébriques associées. Ceci autorise la construction d'une axiomatique de la théorie.

Le **domaine d'applicabilité** est flou : subatomique, basse énergie, vide quantique

# Conclusion

La physique quantique s'est développée en synergie et concurrence entre trois écoles

- mécanique : agrégation des corps, espace vide, forces et vecteurs polaires et axiaux *impulsion, moment* **géométrie**
- physique du continu : superposition d'ondes, éther, champs et opérateurs gradient et rotationnel **analyse**
- entropie : changements d'états, mémoire, espaces vectoriels et opérateurs algébriques. **algèbre**

Ces trois écoles perdurent : respectivement Bohm de Broglie, Schrödinger Dirac, Bohr école de Copenhague.

← Le point de vue privilégié dans cet exposé

L'idée d'une lecture systémique et trifonctionnelle a induit dès le début une structure stable de lecture: le modèle en V et une architecture globale à trois niveaux.

Le contenu de la structure évolue par itération (versions successives d'un document) chaque fois que de nouvelles lectures apportent un éclairage différent.

*Cette structure de lecture et l'apprentissage autodidacte n'a pas pour objet de faire évoluer la théorie quantique et bien des contresens de lecture seront à corriger (par exemple la QED est à peine ébauchée).*