

Rapport scientifique du projet  
« Repenser l'information quantique et l'intrication à la lumière de Simondon » (RIQILS)  
Action financée par le Quantum Information Center (QICS) / l'Idex Sorbonne Université dans  
le cadre du soutien de l'État aux programmes d'investissement d'Avenir

Bruno Bachimont (SU, UTC, Costech) – porteur  
Vincent Bontems (CEA-Mines ParisTech) – co-porteur  
Christian de Ronde (CONICET) – partenaire  
et la participation d'Andrea Bardin (Oxford Brookes University)

## 1. Résumé du projet RIQILS :

Au XXI<sup>e</sup> siècle, l'un des champs de recherche technologique révolutionnaire les plus importants est le vaste domaine relevant du traitement de l'information quantique. Ce terme recouvre différentes applications non classiques exceptionnelles telles que, par exemple, la téléportation quantique, le calcul quantique et la cryptographie quantique. Sans exception, toutes ces nouvelles technologies sont fondées sur la notion d'intrication, qui remonte à de célèbres articles d'Albert Einstein et d'Erwin Schrödinger écrits dans les années 1930, mais qui n'ont commencé à être sérieusement envisagées par les physiciens qu'au cours des années 1990. C'est donc après un demi-siècle d'hibernation que les nouvelles possibilités techniques ont permis de tester expérimentalement en laboratoire ce qu'Einstein et Schrödinger avaient imaginé dans les expériences de pensées.

Depuis, les résultats ont confirmé les prédictions de la mécanique quantique et l'intrication est devenue sans doute la notion la plus essentielle de la théorie des quanta. Cependant, indépendamment de son influence croissante non seulement en physique, en technologie mais aussi en philosophie des sciences, la notion d'intrication présente encore aujourd'hui de graves difficultés techniques, mathématiques et conceptuelles. Beaucoup de ces problèmes sont directement liés aux préjugés classiques surimposés au formalisme mathématique. En particulier, certains concepts sont formulés d'après l'exigence (explicite ou implicite) de faire référence à un domaine microscopique constitué d'entités séparables dans l'espace-temps (ce qui conduit ensuite à se heurter à des paradoxes). Comme nous l'avons déjà exposé ailleurs (Bontems & de Ronde 2011), ces présuppositions ontologiques devraient être considérées comme de redoutables « obstacles épistémologiques » (Bachelard 1938) que les physiciens, philosophes et ingénieurs auront à contourner pour avancer dans leurs recherches théoriques et technologiques.

Afin de lever ces difficultés, nous nous efforcerons, au cours du programme « Repenser l'information quantique et l'intrication à la lumière de Simondon », de considérer une proposition métaphysique spécifique qui, selon nous, pourrait permettre d'aborder le problème de l'intrication dans une nouvelle perspective originale : l'hypothèse de l'état préindividuel (Simondon 2005). À l'instar de Gilbert Simondon, définissant l'état préindividuel comme « plus qu'unité et plus qu'identité », il s'agit, à partir d'une interprétation directe des contraintes du formalisme mathématique de la théorie, d'explorer l'hypothèse qu'une relation physique quantique doit être comprise comme étant « plus qu'inséparabilité » en ce sens qu'elle ne résulte pas de l'existence préalable d'entités séparables mais que la relation préexiste et définit par elle-même un spectre d'individuations quantiques potentielles où séparabilité et inséparabilité apparaissent seulement comme des cas-limites.

Ce travail s'appuie sur des recherches antérieures menées en commun par le physicien et philosophe de la physique Christian de Ronde et le philosophe des sciences et des techniques Vincent Bontems. Il innovera par rapport à ces travaux antérieurs en introduisant une nouvelle hypothèse analogique (« une démarche transductive » dans les termes de Simondon) afin d'éclairer la notion d'intrication sous un nouveau jour et ainsi de permettre une reformulation du concept d'information quantique. Pour ce faire, dans nos échanges, nous mobiliserons, au sein de la théorie de l'individuation de Simondon, non seulement ses analyses de la « préindividualité » mais aussi celles qui portent sur le domaine « transindividuel », c'est-à-dire la communication entre des sujets psycho- sociaux. Notre espérance est qu'un raisonnement analogique mené à partir des modes de communication les plus complexes permettra de repenser à la fois l'information quantique et l'intrication, et d'offrir de nouvelles pistes théoriques et technologiques.

Ce travail sera aussi l'occasion d'interroger les dispositifs d'information quantique en termes de concrétisation, en la distinguant de celle à laquelle on peut assister dans les systèmes d'information qu'il faut bien désormais appeler classiques. Ces derniers, à travers la grammatisation qu'ils mettent en œuvre des entités considérées – la grammatisation étant la reconfiguration que connaît un mode d'expression via une traduction technique (l'écriture comme grammatisation de la parole, le codage numérique des médias comme grammatisation des objets temporels, etc.) – sont en quelque sorte à rebours d'une concrétisation fonctionnelle, montrant au contraire toujours plus de modularité logicielle et moins d'intégration fonctionnelle. La question sera de savoir si les dispositifs d'information quantique abordent la concrétisation de la même manière et, si la réponse est négative, du fait de quelle caractéristique de ces technologies.

2. **Équipes engagées** : Le laboratoire Connaissance, Organisation et Systèmes Techniques (COSTECH, UTC, UPR 2223) ; Le Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière (Larsim-CEA) et la communauté LOGOS (CONICET-Argentine).
3. **Récapitulatif des réunions de travail** : Pour permettre le travail de réflexion collective entre les équipes engagées ainsi que l'élaboration et la préparation des interventions programmées, une douzaine de réunions virtuelles (zoom meetings) ont été organisées à des horaires (15h-17h, heure de Paris) permettant la communication entre France et Argentine. L'intitulé de chacune de ces réunions indique seulement la première question mise à l'ordre du jour et ne rend donc pas compte de l'intégralité de ce qui fut débattu lors de ces séances de travail.

11/02/2021 : Réunion préparatoire – à noter que durant cette séance il fut décidé d'inviter le philosophe Andrea Bardin (Oxford Brooke University) à se joindre aux futures séances de travail.

26/02/2021 : Présentation de l'article « Against Particle Metaphysics and Collapses within the Definition of Quantum Entanglement » (C. de Ronde 2019) et discussion des prolongements.

15/03/2021 : Discussion sur l'interprétation des matrices de Heisenberg en termes d'intensités.

08/04/2021 : Discussion sur les travaux de Karen Barad.

22/04/2021 : Retour critique sur l'héritage conceptuel de Niels Bohr.

13/05/2021 : Discussion sur l'interprétation des matrices de Dirac.

03/06/2021 : Retour sur l'analyse de la non-localité par Bachelard.

17/06/2021 : Réinterprétation de l'intrication d'après l'hypothèse de préindividualité.

29/06/2021 : Préparation de la conférence « *You can't always get what you want...* ».

01/09/2021 : Préparation de la conférence « *You can't always get what you want...* ».

30/09/2021 : Préparation de la journée « Rencontres Quantiques ».

06/10/2021 : Préparation du séjour d'Andrea Bardin et de Christian de Ronde à Paris.

14/10/2021 : Préparation de la conférence « *You can't always get what you want...* ».

4. **Conférence aux Ateliers du Laboratoire Kastler Brossel (LKB) de l'ENS Paris du 21 octobre 2021** : « *You can't always get what you want!* » (Bontems & de Ronde)

**Résumé de la conférence** : La compréhension de la mécanique quantique est obscurcie par un double "obstacle épistémologique" (Bachelard 1938) qui a pris des formes diverses et opposées au sein de l'interprétation de la théorie : le substantialisme et l'instrumentalisme. Tandis que le substantialisme consiste en la présupposition

ontologique que la réalité est composée d'individus dotés d'une unité et d'une identité permanentes (Bontems & de Ronde 2011), l'instrumentalisme est la présupposition antiréaliste que la science consiste seulement en une procédure afin de faire des prédictions sur le résultat de mesures (des "clicks" dans les détecteurs. Certaines recherches épistémologiques engagées dès les années 1930 montraient la nécessité d'élaborer de nouveaux concepts pour restaurer la portée réaliste de la physique en renonçant au substantialisme. Au lieu de chercher de nouveaux concepts, la "solution" bohrienne qui prévalut fut, au contraire, de subvertir de réalisme en conservant les concepts classiques comme des fictions paradoxales illustrant les procédures expérimentales justifiant des sauts conceptuels, telles que "particules quantiques" ou "sauts quantiques".

Une des notions centrales de la mécanique quantique est l'intrication, qui fut originellement conçue par Einstein comme une "mystérieuse action à distance" pour démontrer l'incohérence des sauts quantiques dans le cadre d'un réalisme substantialiste. Même si cette notion ne reçut guère d'attention durant un demi-siècle, elle fut réactivée dans les années 1990 pour être à son tour incluse - notamment en raison de possibles applications pragmatiques - au sein de fictions bohriennes. Après avoir rappelé les bases conceptuelles d'une interprétation simondonienne (réaliste mais non substantialiste) de la mécanique quantique (Bontems & de Ronde 2019), c'est-à-dire « l'hypothèse du préindividuel » et le « postulat du réalisme des relations », nous discuterons quelques incohérences actuelles de la définition orthodoxe de l'intrication.

Notre propos est de montrer que la fiction bohrienne et le formalisme mathématique élaboré par Dirac sont biaisés par le fait qu'ils présupposent l'existence de particules individuées alors que la perspective simondonienne du réalisme des relations implique le questionnement des processus d'individuation qui peuvent (ou non) engendrer de tels individus. Ce changement de perspective permet d'esquisser une compréhension de l'intrication comme relation potentielle de couplage entre des réalités préindividuelles. Cette interprétation réaliste mais non substantialiste surmonte à la fois les obstacles du substantialisme et de l'instrumentalismes et débarrasse la physique des fictions bohriennes : "You can't always get what you want... but why did you want particles in the first place?"

**Les Ateliers du LKB**

**Quantum Information Center**  
ALLIANCE SORBONNE UNIVERSITÉ

**Jeudi 21 octobre, 17h30**  
**Amphi Charpak, Jussieu**

*Vincent Bontems & Christian de Ronde*

**You can't always get what you want ...  
(A simondonian interpretation of quantum entanglement)**

**Apéro à partir de 17h15**

Résumé et infos :  
[lkb.science/ateliers-du-lkb](http://lkb.science/ateliers-du-lkb)

Logos: Laboratoire Kastler-Brossel, Sorbonne Université, PSL, CNRS, Sorbonne Université

5. **Atelier du 23 octobre 2021 à la Maison de la Connaissance et de la Création « Constante et Variable » (Orsay) : « Rencontres Quantiques »** (Bontems & de Ronde)

Programme de la journée :

14h Accueil des participants : V. Bontems, C. de Ronde, A. Grinbaum (CEA), N. Paul (LKB), V. Lapoux (CEA).

14h30 C. de Ronde : "Against Relativism in Quantum Entanglement"

15h30 Discussion

16h Pause café

16h30 Vincent Bontems : "Comment l'interprétation de Shanghai s'est imposée en physique quantique"

17h30 Discussion

18h Visite de l'exposition de René Sultra et Maria Barthélémy



## Fiction Quantique Taoïque

### 3. Pourquoi l'interprétation de Shanghaï s'est-elle imposée au monde scientifique ?

**VINCENT BONTEMS**

Constante & Variable – vendredi 22 octobre 2021

[www.cea.fr](http://www.cea.fr)

 **Quantum Information Center**  
ALLIANCE SORBONNE UNIVERSITÉ

6. Participation aux ateliers « Entrelazamientos: realismo y relacion en fisica y filosofia » des 14 et 15 décembre 2021 à l'université CAECE de Buenos Aires



Quatre communications étaient en rapport direct ou indirect avec le projet RIQILS :

Vincent Bontems : « Simondon's allagmatics and the realism of relations »

Christian de Ronde : « Anti-realist realism and entanglement in physics and philosophy »

Raimundo Fernandez Moujan : « A critique of Enlightenment's experience. Heisenberg, Pauli and Benjamin »

César Massri : « The mathematical formalism of the Logos approach »

Le sigle QICS n'apparaît pas sur l'affiche de ce colloque organisé par le CONICET sans le soutien du projet RIQILS mais il figurait sur les supports de communication de V. Bontems et C. de Ronde.

7. Résultats, publications et prolongements

Le principal résultat de ce programme est évidemment d'ordre intellectuel. Le travail collectif entre les équipes et la confrontation avec les physiciens du LKB et les philosophes sud-américains ont permis l'avancement des réflexions déjà engagées par V. Bontems et C. de Ronde sur le recours à la théorie de l'individuation de Gilbert Simondon pour éclairer les contraintes du formalisme orthodoxe de la mécanique quantique et la conception de l'information quantique et de l'intrication qui en découlent. Ces progrès convergent vers la prise de conscience

épistémologique de la nécessaire révision des concepts historiquement associés aux structures et opérations mathématiques du formalisme quantique afin de pouvoir élucider les paradoxes qui émergent dans le cadre conceptuel standard (substantialiste) hérité des usages incohérents imposés à la communauté par Niels Bohr.

Un approfondissement certain s'est opéré par rapport à nos précédents travaux qui rendait raison du processus d'individuation quantique à partir du formalisme de l'équation de Schrödinger. C'est désormais l'interprétation des matrices de Heisenberg en tant que mesure de l'intensité des potentialités de la préindividualité quantique qui donne accès l'information complète sur l'état des systèmes. Il ressort de cet approfondissement un éclairage critique sur la définition standard des « états » du système adoptés en MQ, ainsi que sur les procédures établies par Dirac pour garantir « la détection d'une particule ». Il s'agit de l'actualisation d'un événement (click) au sein d'un détecteur auquel on assigne fallacieusement une identité substantielle à travers un concept classique (« une particule ») inadéquat.

Par rapport aux travaux précédents, où le théorème de Kochen-Specker établissait la nécessité du recours à l'hypothèse simondonienne de la préindividualité pour comprendre les systèmes quantiques, l'intégration des résultats obtenus par C. de Ronde et C. Massri sur la possibilité d'appliquer la théorie des catégories à l'ensemble des matrices de Heisenberg pour dépasser les limites de la contextualité permet un autre approfondissement. Dans la perspective du réalisme des relations simondonien, l'intrication est conçue comme une manifestation de l'existence de relations au sein de l'état préindividuel : ces relations étant ontogénétiquement antérieures au processus d'individuation quantique d'où émergent des actualisations situées dans l'espace-temps, elles doivent être conçues indépendamment de la distinction entre des états « séparés » ou « inséparés » qui ont été définis en fonction des contraintes destinées à garantir que la phénoménotechnique aboutisse à « la détection d'une particule ». L'intrication cesse d'être paradoxale dès lors qu'elle est conçue comme la persistance d'un faisceau de relations potentielles entre les intensités des potentialités quantiques au sein de l'état préindividuel. Car les paradoxes de la non-séparabilité ne sont que des retombées métaphysiques du cadre substantialiste surimposé aux expériences. *Lorsqu'une relation d'intrication est actualisée ne se produit aucune création ou destruction d'information : les autres relations potentielles d'intrication existent toujours (mais elles demeurent potentielles donc hors de portée des procédures de « détection »).*

Notre recherche s'apparente par certains côtés à une fouille archéologique retirant peu à peu les sédiments conceptuels accumulés par l'histoire de la mécanique quantique qui aboutissent aux embarras conceptuels et théoriques des travaux actuels sur l'information quantique ainsi qu'aux pseudo-paradoxes de l'intrication. Cette démarche heurte inévitablement les (mauvaises) habitudes de pensées consistant à maintenir en circulation des concepts classiques inadéquats pour mettre en scène des « modèles » incohérents, truffés d'obscurs sauts conceptuels et de notions ad hoc tels que « sauts quantiques », « non séparabilité », etc. Nous avons pu observer que la perspective d'un rétablissement d'un réalisme non-substantialiste ne suscitaient ni scepticisme ni hostilité de la part des physiciens, qui étaient plutôt demandeurs de prolongements, en particulier quant à l'élaboration de protocoles expérimentaux alternatifs afin d'exploiter l'ensemble des intensités des potentialités quantiques de l'état préindividuel des systèmes quantiques. Il s'agit donc d'une piste à poursuivre.

Plusieurs publications sont prévues dont une a déjà été acceptée :

Vincent Bontems & Christian de Ronde « Simondon e la meccanica quantistica (o, intorno a come l'ipotesi del "preindividuale" conduce a un'interpretazione realista, ma non-sostanzialista del formalismo quantistico ortodosso) », *err. Scritture dell'imprevisto*, n°9 « la prima », à paraître en juillet 2022.

Il s'agit d'une traduction en italien d'une version révisée et enrichie par les résultats du programme RIQILS de l'article de V. Bontems et C. de Ronde « Simondon and Quantum Mechanics » (*Philosophy Today*, 2019).

Parmi les autres prolongements envisagés, une communication de C. de Ronde sur de nouvelles technologies de l'information quantiques fondées sur les résultats du projet RIQILS est prévue lors d'une future semaine de Cerisy-la-Salle en septembre 2023.

Les participants à ce projet et auteurs de ce rapport tiennent pour finir à remercier Brigitte Lebel, assistante du laboratoire Costech, Nancy Paul, organisatrice des Ateliers du LKB, et les personnels de l'université CAECE, pour leur soutien logistique, financier et personnel aux divers événements du projet RIQILS.