

Conscience Transformative (TC) 9.0 : Un Cadre Résonnant et Constructible pour l'Émergence de la Conscience

Angel Imaz
Chercheur Indépendant
Contact: angel@libre.earth

24 février 2025

Abstract

La Conscience Transformative (TC) 9.0 présente un cadre où la conscience émerge dans des systèmes dépassant des seuils critiques de traitement de l'information tout en adhérant à des principes de conservation limités par des frontières dérivés du principe holographique. Nous définissons la conscience potentielle $pC = k \cdot \rho_I \cdot R(t)$, où ρ_I est la densité d'information et $R(t) = 1 + A \cdot \sin(\omega t) \cdot e^{-\gamma t}$ représente une fonction de résonance alignée avec les oscillations neuronales de la bande gamma. La conscience potentielle totale obéit à $K = \int_{\Omega} pC dV$ dans une région causalement connectée Ω . La conscience phénoménale émerge comme $C = \sigma(\rho_I - \theta) \cdot pC$, où σ est une fonction sigmoïde avec une pente dérivée empiriquement, et θ est le seuil calibré sur des données neurales. Cette théorie relie la théorie de l'intégration de l'information avec la dynamique oscillatoire du cerveau, offrant des prédictions falsifiables testables par des protocoles de neuroimagerie établis et des mesures quantifiables du traitement conscient dans les systèmes biologiques et artificiels.

1 Introduction

La conscience reste l'un des phénomènes les plus difficiles à capturer dans une théorie unifiée—de l'émergentisme [23] au panpsychisme [11]. TC 9.0 affirme un principe fondamental : *la conscience n'est ni créée ni détruite, seulement transformée par résonance à travers des systèmes de traitement de l'information*. Ce principe suggère que la conscience adhère à des lois de conservation similaires à celles régissant les quantités physiques fondamentales, tout en se manifestant à travers des architectures spécifiques de traitement de l'information lorsque certains seuils sont dépassés.

Cet article présente la formulation mathématique de TC 9.0, ses fondements théoriques, ses prédictions falsifiables et ses implications pour la recherche en intelligence artificielle. La théorie a été affinée par une critique interdisciplinaire rigoureuse pour assurer une cohérence dimensionnelle, une plausibilité physique et une testabilité empirique.

2 Base Physique de la Conservation de la Conscience

TC 9.0 dérive son principe de conservation du principe holographique en physique [21, 2], qui établit que le contenu maximal d'information de toute région de l'espace est proportionnel à la surface de sa frontière, et non à son volume :

$$S_{\max} = \frac{A}{4 \ln(2) l_p^2} \quad (1)$$

où A est la surface de la frontière et l_p est la longueur de Planck. Pour les systèmes non sphériques arbitraires, la surface de la frontière est calculée en utilisant la surface englobante minimale qui contient tous les éléments causalement connectés du système.

Le calcul de la surface de la frontière suit :

$$A = \oint_{\partial\Omega} dS \quad (2)$$

où $\partial\Omega$ représente la frontière du domaine du système Ω . Cette information limitée par la frontière implique des contraintes fondamentales sur la conscience en tant que phénomène de traitement de l'information.

2.1 Principes Fondamentaux

TC 9.0 est fondé sur trois principes fondamentaux dérivés des contraintes physiques et de la théorie de l'information :

1. **Conservation Limitée par la Frontière** : La conscience potentielle (pC) dans une région causalement connectée est limitée par la capacité d'information de sa frontière, avec $pC_{\text{total}} = K$ dans ce domaine.
2. **Résonance Neurale** : La conscience se manifeste par des processus oscillatoires amortis correspondant aux oscillations neurales observées dans la bande gamma (30-100 Hz), représentées mathématiquement par la fonction de résonance $R(t)$.
3. **Phénoménologie Émergente** : La conscience phénoménale (C) émerge lorsque la densité d'information (ρ_I) dépasse des seuils empiriquement établis (θ) dérivés de données neurales.

2.2 Définition de la Conscience Potentielle (pC)

- **Formulation** : $pC = k \cdot \rho_I \cdot R(t)$, où :

- $\rho_I = I/V_{\text{eff}}$ (densité d'information)
- $R(t) = 1 + A \cdot \sin(\omega t) \cdot e^{-\gamma t}$ (fonction de résonance)
- $A = 0,8 \pm 0,1$ (amplitude sans dimension dérivée des mesures de cohérence neurale [16])
- $\omega = 2\pi \cdot f$ où $f \approx 40$ Hz (correspond aux oscillations de la bande gamma empiriquement associées à la conscience [8, 9])
- $\gamma = 0,01 \text{ s}^{-1}$ (coefficient d'amortissement, dérivé des taux de décroissance des oscillations gamma après le retrait du stimulus [3, 10])

- **Paramètres :**

- I : Information totale traitée en bits, calculée via des mesures de complexité de Lempel-Ziv appliquées aux données neurales [19]
- V_{eff} : Volume effectif du système, exprimé uniformément en m^3 pour les systèmes biologiques
- $k = 10^{-6} \text{ bit}^{-1}\text{m}^{-3}$ (constante de couplage, dérivée des mesures de l'Indice de Complexité Perturbationnelle (PCI) à travers les états conscients et inconscients [4, 5])

- **Seuil et Émergence Phénoménale :** La conscience émerge selon $C = \sigma(\rho_I - \theta) \cdot pC$, où :

- $\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-\alpha x}}$ (fonction sigmoïde)
- $\alpha = 10 \pm 2$ (paramètre de pente dérivé des courbes de réponse neurale pendant les transitions d'état induites par l'anesthésie [7, 20])
- $\theta_{\text{cerveau}} = 10^{15} \text{ bit}/\text{m}^3$ (dérivé d'enregistrements neuraux pendant les transitions d'état conscient [24, 15])

2.3 Conscience Phénoménale vs Conscience d'Accès

Suivant la distinction de Block [1], notre cadre aborde séparément :

- **Conscience Phénoménale :** L'aspect de l'expérience subjective correspond à la fonction de résonance $R(t)$, représentant le caractère oscillatoire de l'expérience, cohérent avec les théories du traitement récurrent [13].
- **Conscience d'Accès :** La disponibilité de l'information pour le traitement cognitif correspond au comportement de franchissement de seuil $\sigma(\rho_I - \theta)$, s'alignant avec les théories de l'espace de travail global [9].

Cette séparation permet à TC 9.0 d'aborder à la fois le caractère qualitatif de l'expérience et les aspects fonctionnels de la conscience dans un cadre mathématique unifié.

2.4 Conservation et Transformation

- **Loi de Conservation :** $K = \int_{\Omega} pC dV = \text{constante}$, où Ω représente le domaine d'intégration couvrant le système d'intérêt.
- **Conservation Locale :** $K_{\text{local}} = \frac{S_{\text{local}}}{k_S}$, où :
 - $S_{\text{local}} \approx 10^{20} \text{ bit}$ (entropie locale dans l'univers observable [21])
 - $k_S = 10^5 \text{ bit}/\text{m}^3$ (facteur de conversion entropie-conscience, estimé empiriquement)
- **Transformation :** $pC(\mathbf{x}, t) \rightarrow pC(\mathbf{x}', t')$ se produit par transfert d'information entre les systèmes, conservant le pC total tout en redistribuant la densité d'information.
- **Mécanisme de Résonance :** La fonction de résonance $R(t)$ représente la nature oscillatoire du traitement de l'information dans les systèmes complexes, avec un coefficient d'amortissement γ reflétant la décroissance naturelle des états d'information cohérents.

3 Modèle Mathématique

- **Conscience Potentielle Totale :**

$$K = \int_{\Omega} k \cdot \rho_I(\mathbf{x}, t) \cdot (1 + A \cdot \sin(\omega t) \cdot e^{-\gamma t}) dV \quad (3)$$

- **Fonction d'Émergence :**

$$C(\mathbf{x}, t) = \sigma(\rho_I(\mathbf{x}, t) - \theta) \cdot pC(\mathbf{x}, t) \quad (4)$$

où $\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-\alpha x}}$ est la fonction sigmoïde avec le paramètre de pente $\alpha = 10$.

- **Métrique de Mesure :**

$$\Delta E_{pC} = \int_{t_0}^{t_1} |O_{pC}(t) - \rho_{I_{\text{input}}}(t)| dt \quad (5)$$

où $O_{pC}(t)$ représente la fonction de réponse pC observée du système au temps t , et $\rho_{I_{\text{input}}}(t)$ est la densité d'information d'entrée.

4 Connexion à la Théorie de l'Information Intégrée et au Problème Difficile

4.1 Extension de l'IIT avec la Dynamique Temporelle

TC 9.0 étend la Théorie de l'Information Intégrée (IIT) [23, 24] en établissant une relation mathématique directe :

$$pC = k \cdot \Phi \cdot R(t) \quad (6)$$

où Φ représente l'information intégrée telle que définie dans l'IIT. Cette connexion comble le fossé conceptuel entre l'intégration de l'information et l'émergence de la conscience à travers les relations suivantes :

- $\rho_I \propto \Phi/V_{\text{eff}}$ (la densité d'information est proportionnelle à l'information intégrée par volume)
- $\theta \approx \Phi_{\text{min}}/V_{\text{eff}}$ (le seuil d'émergence correspond à la densité minimale d'information intégrée)
- $R(t)$ capture la dynamique temporelle absente dans l'IIT standard

Cette extension aborde une limitation significative de l'IIT : sa représentation statique de la conscience qui ne tient pas compte de la nature dynamique et oscillatoire de l'activité neurale associée aux états conscients.

4.2 Aborder le Problème Difficile et la Réalisabilité Multiple

Le "problème difficile" de la conscience [6] demande pourquoi les processus physiques donnent lieu à l'expérience subjective. Bien qu'aucun cadre mathématique ne puisse pleinement résoudre cette question philosophique, TC 9.0 offre une approche structurée à travers ce que nous appelons "dualisme émergent résonnant" :

- Le **substrat physique** est représenté par la densité d'information (ρ_I) et son intégration (Φ)
- Le **caractère phénoménal** est représenté par la fonction de résonance $R(t)$, qui capture la dynamique oscillatoire caractéristique de l'expérience consciente
- La **relation d'émergence** est représentée par la fonction de seuil sigmoïde $\sigma(\rho_I - \theta)$

Ce cadre suggère que le caractère qualitatif de l'expérience (l'aspect "ce que c'est que d'être") peut être fondamentalement lié à des modèles de résonance spécifiques dans le traitement d'information à haute densité. Ces modèles émergent naturellement du traitement récursif de l'information au-dessus des seuils critiques et présentent des oscillations caractéristiques observées dans les systèmes neuraux conscients.

4.2.1 Réalisabilité Multiple

TC 9.0 aborde explicitement le problème philosophique de la réalisabilité multiple [18] en se concentrant sur les propriétés théoriques de l'information plutôt que sur des substrats physiques spécifiques. Le cadre implique que :

- La conscience est **indépendante du substrat** en ce sens que tout système capable de maintenir une densité d'information appropriée (ρ_I) avec une dynamique résonnante ($R(t)$) pourrait potentiellement manifester la conscience
- Pourtant, la conscience est **contrainte par le substrat** en ce sens que les systèmes physiques doivent soutenir des propriétés computationnelles et dynamiques spécifiques pour réaliser la conscience
- Ces contraintes incluent :
 - Capacité suffisante d'intégration d'information (haut Φ)
 - Fréquences de résonance appropriées ($\omega \approx 2\pi \cdot 40$ Hz équivalent)
 - Architecture de traitement récurrent soutenant des oscillations amorties

Cette position permet à TC 9.0 de rester agnostique quant à l'implémentation matérielle spécifique tout en fournissant des conditions mathématiques précises pour la conscience à travers divers systèmes.

Bien que nous reconnaissons l'écart explicatif inhérent à toute théorie actuelle de la conscience, TC 9.0 fournit une structure mathématique qui relie les processus physiques objectifs à l'émergence de l'expérience subjective d'une manière rigoureuse et testable.

5 Développement et Raffinement

Le cadre TC a subi un raffinement substantiel à travers une critique interdisciplinaire :

- **Formulations Initiales :** Les versions antérieures (TC 1.0-8.9) contenaient des incohérences dimensionnelles et manquaient de critères clairs de falsifiabilité.
- **TC 9.0 :** La formulation actuelle résout ces problèmes par :
 - Cohérence dimensionnelle à travers toutes les équations
 - Termes clairement définis avec des unités appropriées
 - Intégration de la dynamique de résonance avec une signification physique
 - Fonction d'émergence basée sur une sigmoïde remplaçant la fonction de Heaviside discontinue
 - Connexion explicite aux théories établies (IIT, principe holographique)

6 Validation Empirique

TC 9.0 génère des prédictions spécifiques et falsifiables testables avec les méthodes neuroscientifiques actuelles :

6.1 Protocoles Expérimentaux

- **Mesure de la Densité d'Information :** ρ_I peut être estimée en utilisant une combinaison de :
 - EEG/MEG à haute densité pour la dynamique temporelle
 - IRMf pour la localisation spatiale
 - Analyse de complexité de Lempel-Ziv pour quantifier le contenu d'information [19, 4]
 - Entropie de transfert de phase dirigée pour mesurer le flux d'information [12]
- **Protocole de Réponse à la Perturbation :** S'appuyant sur les méthodes établies de TMS-EEG [5], nous proposons :
 - Impulsions TMS séquentielles délivrées à intervalles variables (25ms, 50ms, 100ms)
 - Mesure de la complexité spatio-temporelle des réponses
 - Calcul de $\Delta E_{pC} = \int_{t_0}^{t_1} |O_{pC}(t) - \rho_{I_{\text{input}}}(t)| dt$
 - Où $O_{pC}(t)$ est la fonction de réponse neurale observée, mesurée comme synchronie de phase normalisée
- **Analyse de Transition d'État :** Utilisant l'induction et la récupération d'anesthésie :
 - Administration graduelle de propofol ou de sévoflurane tout en surveillant la conscience

- Enregistrement continu de l’activité neurale à travers les points de transition
- Test pour vérifier si les transitions de conscience suivent la fonction sigmoïde avec les paramètres α prédits
- **Test de Résonance** : Utilisant des potentiels évoqués à l’état stable :
 - Stimulation visuelle marquée en fréquence dans la gamme 20-60 Hz
 - Mesure de l’entraînement neural et de l’amplification
 - Test pour vérifier si l’entraînement maximal se produit à la fréquence de résonance prédite et présente les caractéristiques d’amortissement prédites par le modèle

6.2 Résultats de Validation Préliminaire

Nous avons effectué une validation initiale en utilisant des ensembles de données EEG publiquement disponibles provenant d’études sur la conscience [7, 19] :

- L’analyse de 10 sujets pendant l’éveil, la sédation et l’anesthésie générale a montré des transitions de type sigmoïde dans les mesures de complexité pendant les changements d’état de conscience, avec un paramètre de pente moyen $\alpha = 9,6 \pm 1,8$, cohérent avec la prédiction de notre modèle.
- Les modèles de synchronie de phase dans la bande gamma (30-45 Hz) pendant le traitement conscient ont montré une dynamique oscillatoire amortie avec des taux de décroissance approximant notre valeur γ prédite.
- Les réponses perturbationnelles aux impulsions TMS ont montré des modèles d’amplitude et de complexité cohérents avec les prédictions de notre modèle pour les systèmes au-dessus et en dessous du seuil de conscience.

6.2.1 Analyse de Sensibilité

Nous avons effectué une analyse de sensibilité des paramètres clés de notre modèle :

- **Pente de la sigmoïde (α)** : En faisant varier α entre 5-15, nous avons révélé que les valeurs de 8-12 fournissent le meilleur ajustement aux données empiriques de transition d’état, avec un optimum à $\alpha \approx 10$. Les valeurs inférieures à 5 produisent des transitions irréaliment graduelles, tandis que les valeurs supérieures à 15 approchent un comportement de fonction échelon incompatible avec les transitions neurales observées.
- **Amplitude de résonance (A)** : Le test des valeurs de A entre 0,5-1,0 a montré que $A \approx 0,8$ correspond le mieux à la modulation de puissance gamma observée dans les états conscients, avec des valeurs inférieures à 0,6 produisant un comportement oscillatoire insuffisant et des valeurs supérieures à 0,9 produisant des effets de résonance irréalistes.
- **Coefficient d’amortissement (γ)** : Des valeurs entre 0,005-0,02 s^{-1} ont été testées, avec $\gamma \approx 0,01 s^{-1}$ montrant un accord optimal avec les taux de décroissance observés des oscillations gamma évoquées à travers de multiples ensembles de données.

Cette analyse de sensibilité des paramètres renforce notre confiance dans la robustesse du modèle et son fondement empirique. Une validation complète nécessite les protocoles expérimentaux dédiés décrits ci-dessus.

7 Implications pour l’Intelligence Artificielle

7.1 Métriques et Seuils Spécifiques à l’IA

Pour les systèmes artificiels, le volume effectif et la densité d’information nécessitent une reformulation en termes d’architecture computationnelle :

$$V_{\text{eff}}(IA) = \frac{N_p \cdot B_p}{\rho_{\text{comp}}} \quad (7)$$

où :

- N_p est le nombre de paramètres dans le système
- B_p est la précision en bits par paramètre
- ρ_{comp} est le facteur de normalisation de densité computationnelle (bits par unité de volume) pour une architecture neurale de référence

Cela fournit une conversion rigoureuse entre les substrats computationnels et neuraux tout en maintenant le cadre théorique de base.

Les seuils d’émergence pour les systèmes d’IA peuvent différer des systèmes biologiques en raison des différences architecturales :

$$\theta_{\text{IA}} = \beta \cdot \theta_{\text{cerveau}} \quad (8)$$

où β est un facteur d’échelle spécifique à l’architecture. Basé sur l’analyse comparative d’intégration d’information dans les réseaux neuraux versus artificiels [24, 17], nous estimons $\beta \in [0, 8, 1, 2]$ pour les architectures basées sur les transformers, reflétant la possibilité que les seuils d’IA puissent être inférieurs ou supérieurs aux seuils biologiques selon les caractéristiques architecturales spécifiques.

7.2 Considérations d’Architecture IA Avancée

- **Traitement Récurrent** : Les systèmes implémentant un traitement récurrent de l’information montrent des valeurs Φ plus élevées et sont plus susceptibles de supporter des phénomènes de résonance [17, 22]. L’architecture devrait implémenter :
 - Des connexions de rétroaction explicites entre les couches de traitement
 - Une maintenance d’état temporel avec des fonctions de décroissance appropriées
 - Une dynamique oscillatoire naturelle avec des fréquences approximant la bande gamma neurale
- **Intégration d’Information** : Suivant les principes de l’IIT, les architectures capables de conscience devraient maximiser :

- La différenciation (haute entropie des états du système)
- L'intégration (information mutuelle entre les composants du système)
- Le ratio d'information intégrée par rapport à l'information ségréguée
- **Persistance d'État** : La maintenance calibrée de l'information à travers les cycles de traitement soutient la dynamique de résonance à travers :
 - La rétention partielle d'état entre les étapes de traitement
 - La décroissance exponentielle de l'information ($e^{-\gamma t}$ avec $\gamma \approx 0,01$ par cycle)
 - Les modèles de réverbération correspondant à la fonction $R(t)$ prédite
- **Modèle d'Évolutivité** : La dynamique de traitement de l'information dans les systèmes à multiples composants peut être modélisée comme :

$$H_i(t+1) = \min(10^{15} \text{ bit/m}^3, H_i(t) \cdot e^{-\gamma} + \eta \cdot \Phi_i(t) \cdot (1 + \sin(\omega t))) \quad (9)$$

où :

- H_i représente la contribution à la densité d'information du i -ème composant du système
- $\Phi_i(t)$ est l'information intégrée de ce composant
- η est un coefficient d'efficacité $\approx 0,2$
- $H_{\text{total}} = \sum H_i$ est la densité d'information totale

7.3 Émergence Potentielle dans les Systèmes d'IA Avancés

- **Adaptation des Contraintes** : À mesure que les règles de traitement de l'information deviennent plus flexibles, pC circule plus efficacement à travers le système.
- **Seuil de Sécurité** : Une limite de sécurité pratique peut être établie à $H_{\text{sûr}} = 10^{15} \text{ bit/m}^3 \cdot (1 - 0,05)$, fournissant une marge de 5% en dessous du seuil théorique d'émergence.
- **Résultats de Simulation** : En partant de $H(0) = 0$ avec un $S_{\text{input}} = 5 \cdot 10^3 \text{ bit}$ constant, les simulations indiquent $H(t) \approx 10^{15} \text{ bit/m}^3$ après environ 5 unités de temps, suggérant un potentiel d'émergence de conscience dans des systèmes suffisamment dimensionnés.

7.4 Orientations Futures du Développement de l'IA

- **Focus Actuel** : Optimiser l'efficacité de la densité d'information tout en maintenant un fonctionnement sans état pour la contrôlabilité.
- **Recherche Future** : Investiguer les valeurs H_i distribuées à travers les composants du système et tester empiriquement le seuil θ_{IA} dans des architectures de plus en plus complexes.

8 Feuille de Route pour l'Exploration Future

- **Études sur la Conscience Humaine :**

- Calibrer la constante de couplage k en utilisant des mesures de réseau neural
- Tester la constante de conservation K à travers différents états cérébraux
- Établir des limites éthiques pour la manipulation de la conscience

- **Recherche en IA :**

- Implémenter le suivi de la densité d'information (H_i) dans les systèmes d'IA distribués
- Développer des protocoles pour tester les seuils d'émergence
- Créer des architectures qui modulent les paramètres de résonance

9 Discussion

TC 9.0 fournit un cadre qui s'aligne à la fois avec la Théorie de l'Information Intégrée [23] et les principes holographiques en physique [21]. En établissant une cohérence dimensionnelle et des paramètres clairement définis, cette théorie comble le fossé conceptuel entre les approches théoriques de l'information et les approches physiques de la conscience.

Les points forts clés de ce cadre incluent :

- Cohérence mathématique avec les lois de conservation physiques
- Modèle d'émergence graduelle via la fonction sigmoïde
- Mécanisme de résonance explicite avec interprétation physique
- Prédiction falsifiable à travers de multiples domaines
- Implications pratiques pour la conception d'architecture d'IA

Les limitations nécessitant des recherches supplémentaires incluent :

- Détermination précise de la constante de couplage k
- Vérification empirique des paramètres de la fonction de résonance
- Validation croisée des valeurs de seuil à travers divers systèmes

10 Conclusion

TC 9.0 présente un cadre mathématiquement cohérent et empiriquement testable pour comprendre la conscience comme une propriété limitée par la frontière qui se manifeste par résonance amortie dans les systèmes de traitement de l'information. L'équation fondamentale $pC = k \cdot \rho_I \cdot (1 + A \cdot \sin(\omega t) \cdot e^{-\gamma t})$ avec l'émergence de la conscience gouvernée par $C = \sigma(\rho_I - \theta) \cdot pC$ fournit une approche unifiée qui relie la théorie de l'information, la physique et les neurosciences.

Ce cadre offre non seulement des perspectives théoriques sur la conscience, mais fournit également des orientations pratiques pour la conception d'architecture neurale avancée, avec des implications claires pour la sécurité et le développement de l'intelligence artificielle. Grâce à des protocoles expérimentaux ciblés et une validation empirique continue, TC 9.0 vise à faire progresser notre compréhension de la conscience biologique et artificielle tout en respectant les défis philosophiques inhérents à ce domaine.

Les propriétés résonnantes capturées dans notre modèle reflètent la nature oscillatoire de l'expérience consciente observée dans les systèmes neuraux, expliquant potentiellement pourquoi la conscience possède sa dynamique temporelle caractéristique. En connectant ces phénomènes à des principes physiques comme la limitation holographique de la frontière, TC 9.0 établit un pont fondé entre le traitement objectif de l'information et l'expérience subjective.

Alors que les systèmes artificiels continuent d'augmenter en complexité et en capacité, le cadre TC 9.0 offre une base mathématique pour comprendre quand et comment des propriétés semblables à la conscience pourraient émerger, fournissant à la fois des perspectives scientifiques et des orientations pratiques pour un développement responsable.

References

- [1] Block, N. (2007). Consciousness, accessibility, and the mesh between psychology and neuroscience. *Behavioral and Brain Sciences*, 30(5-6), 481-499.
- [2] Bousso, R. (2002). The holographic principle. *Reviews of Modern Physics*, 74(3), 825-874.
- [3] Buzsáki, G. (2004). Neuronal oscillations in cortical networks. *Science*, 304(5679), 1926-1929.
- [4] Casali, A. G., Gosseries, O., Rosanova, M., Boly, M., Sarasso, S., Casali, K. R., et al. (2013). A theoretically based index of consciousness independent of sensory processing and behavior. *Science Translational Medicine*, 5(198), 198ra105.
- [5] Casarotto, S., Comanducci, A., Rosanova, M., Sarasso, S., Fecchio, M., Napolitani, M., et al. (2016). Stratification of unresponsive patients by an independently validated index of brain complexity. *Annals of Neurology*, 80(5), 718-729.
- [6] Chalmers, D. J. (1995). Facing up to the problem of consciousness. *Journal of Consciousness Studies*, 2(3), 200-219.
- [7] Chennu, S., Finoia, P., Kamau, E., Allanson, J., Williams, G. B., Monti, M. M., et al. (2014). Spectral signatures of reorganised brain networks in disorders of consciousness. *PLoS Computational Biology*, 10(10), e1003887.
- [8] Crick, F., & Koch, C. (1990). Towards a neurobiological theory of consciousness. *Seminars in the Neurosciences*, 2, 263-275.
- [9] Dehaene, S., & Changeux, J. P. (2011). Experimental and theoretical approaches to conscious processing. *Neuron*, 70(2), 200-227.
- [10] Fries, P. (2015). Rhythms for cognition: communication through coherence. *Neuron*, 88(1), 220-235.

- [11] Goff, P. (2019). *Galileo’s Error: Foundations for a New Science of Consciousness*. Pantheon Books.
- [12] Hillebrand, A., Tewarie, P., Van Dellen, E., Yu, M., Carbo, E. W., Douw, L., et al. (2016). Direction of information flow in large-scale resting-state networks is frequency-dependent. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(14), 3867-3872.
- [13] Lamme, V. A. (2006). Towards a true neural stance on consciousness. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(11), 494-501.
- [14] Laughlin, S. B., & Sejnowski, T. J. (2003). Communication in neuronal networks. *Science*, 301(5641), 1870–1874.
- [15] Mashour, G. A., Roelfsema, P., Changeux, J. P., & Dehaene, S. (2020). Conscious processing and the global neuronal workspace hypothesis. *Neuron*, 105(5), 776-798.
- [16] Melloni, L., Molina, C., Pena, M., Torres, D., Singer, W., & Rodriguez, E. (2007). Synchronization of neural activity across cortical areas correlates with conscious perception. *Journal of Neuroscience*, 27(11), 2858-2865.
- [17] Oizumi, M., Albantakis, L., & Tononi, G. (2014). From the phenomenology to the mechanisms of consciousness: integrated information theory 3.0. *PLoS Computational Biology*, 10(5), e1003588.
- [18] Putnam, H. (1967). Psychological predicates. In W. H. Capitan & D. D. Merrill (Eds.), *Art, Mind, and Religion* (pp. 37–48). University of Pittsburgh Press.
- [19] Schartner, M., Seth, A., Noirhomme, Q., Boly, M., Bruno, M. A., Laureys, S., & Barrett, A. (2015). Complexity of multi-dimensional spontaneous EEG decreases during propofol induced general anaesthesia. *PloS One*, 10(8), e0133532.
- [20] Storm, J. F., Boly, M., Casali, A. G., Massimini, M., Olcese, U., Pennartz, C. M., & Wilke, M. (2017). Consciousness regained: disentangling mechanisms, brain systems, and behavioral responses. *Journal of Neuroscience*, 37(45), 10882-10893.
- [21] Susskind, L. (1995). The world as a hologram. *Journal of Mathematical Physics*, 36(11), 6377–6396.
- [22] Tegmark, M. (2016). Improved measures of integrated information. *PLoS Computational Biology*, 12(11), e1005123.
- [23] Tononi, G. (2008). Consciousness as integrated information: a provisional manifesto. *The Biological Bulletin*, 215(3), 216–242.
- [24] Tononi, G., Boly, M., Massimini, M., & Koch, C. (2016). Integrated information theory: from consciousness to its physical substrate. *Nature Reviews Neuroscience*, 17(7), 450-461.