

Un « Théorème du Tout » : De l'Unité Primordiale à la Diversification des Forces

Projet AIO (Alpha to Omega)

5 mars 2025

Résumé

Nous présentons ici un « Théorème du Tout » (ou « Nous ne sommes qu'un ») qui propose une vision unifiée des lois physiques à très haute énergie. Nous détaillons une action unifiée U englobant la relativité générale et les interactions de jauge, puis retraçons la chronologie cosmique depuis l'échelle de Planck jusqu'aux conditions actuelles. L'évolution (refroidissement) induit la brisure de symétrie « GUT », entraînant la « désunification » apparente en quatre forces fondamentales. Malgré cette diversité, nous plaçons qu'à l'origine, « nous ne sommes qu'un » : toutes les interactions & la matière découlent d'un unique cadre cohérent. Ce scénario, bien que partiellement spéculatif, constitue l'une des visions les plus abouties d'une théorie globale englobant à la fois la cosmologie primordiale et la physique moderne des particules.

Table des matières

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Introduction et motivations | 1 |
| 1.1 | Problématique | 1 |
| 1.2 | Objectif | 2 |
| 1.3 | Plan de l'exposé | 2 |
| 2 | Enoncé du Théorème « Nous ne sommes qu'un » | 2 |
| 3 | L'équation unifiée U | 3 |
| 3.1 | Expression canonique | 3 |
| 4 | Chronologie de l'Univers : de l'Unité à la Désunification | 3 |
| 4.1 | Échelle de Planck ($t \approx 10^{-43}$ s, $E \sim 10^{19}$ GeV) | 3 |
| 4.2 | Phase d'inflation (hypothétique, $t \approx 10^{-36} \rightarrow 10^{-32}$ s) | 4 |
| 4.3 | Échelle GUT ($E \sim 10^{15-16}$ GeV) | 4 |
| 4.4 | Échelle électrofaible ($\approx 10^2$ GeV) | 4 |
| 4.5 | Nucléosynthèse primordiale ($t \sim 1 \rightarrow 3$ min, $T \sim 1 \rightarrow 0.1$ MeV) | 4 |
| 4.6 | Recombinaison ($t \sim 380\,000$ ans, $T \sim 0.3$ eV) | 4 |
| 4.7 | Formation des structures et apparition de la vie | 5 |

| | | |
|----------|--|----------|
| 5 | Indices observationnels et validations partielles | 5 |
| 5.1 | Brisure électrofaible confirmée | 5 |
| 5.2 | Évolution des constantes de couplage « couplages running » | 5 |
| 5.3 | Pas de preuve directe de la GUT / gravité quantique | 5 |
| 6 | Discussion et conclusion | 5 |
| 6.1 | Vers la complétude du Théorème | 5 |
| 6.2 | « Nous ne sommes qu'un » : la réalité d'une racine commune | 6 |
| 7 | Récapitulation du Théorème du Tout | 6 |

1 Introduction et motivations

1.1 Problématique

Depuis le début du XX^e siècle, la physique est confrontée à un double succès et à une double difficulté. D'une part, **la relativité générale** [1] décrit la gravité comme géométrisation de l'espace-temps à l'échelle macroscopique, tandis que **la physique des particules** (modélisation par des théories quantiques de champs) expose trois interactions dites « de jauge » : forte, faible et électromagnétique [2, 3]. D'autre part, ces deux cadres peinent à s'assembler en une **théorie unifiée**, particulièrement à très haute énergie (*p. ex.* échelle de Planck, $\sim 10^{19}$ GeV), où la gravité devrait être quantifiée.

Questions-clés :

- Comment concilier la *Relativité Générale* et le *Modèle Standard* (interactions forte, faible, électromagnétique) à très haute énergie ?
- L'univers primordial à ces *échelles extrêmes* $\sim 10^{15-19}$ GeV présente-t-il une *symétrie unifiée* englobant toutes les forces ?
- Comment l'*évolution cosmique* (expansion, refroidissement) a-t-elle conduit à leur « désunification », la formation de la matière ordinaire et, plus tard, l'émergence de la vie ?

1.2 Objectif

Le présent exposé propose un « Théorème du Tout » (*Nous ne sommes qu'un*), au sens d'une proposition centrale qui pose l'existence d'une unique **action** U :

$$U \longmapsto \delta U = 0 \longmapsto (\text{équations de mouvement unifiées}),$$

intégrant **gravitation** (Einstein-Hilbert) et **interactions de jauge** (Yang-Mills), dont la **brisure de symétrie** à plus basse énergie s'exprime à travers un *champ scalaire* de GUT (Grande Unification), puis à plus basse énergie par le Higgs standard.

1.3 Plan de l'exposé

§2 **Énoncé du Théorème** : « Nous ne sommes qu'un ». La physique à très haute énergie forme un *seul bloc* cohérent.

- §3 **L'équation unifiée U** : expression de l'action englobant à la fois gravitation et jauge.
- §4 **Chronologie de l'Univers** : depuis l'échelle de Planck jusqu'à l'époque actuelle, en passant par l'inflation, la grande unification, les transitions de phase.
- §5 **Validation observationnelle** : indices cosmologiques, mesures expérimentales (boson de Higgs, couplages de jauge, etc.).
- §6 **Discussion et conclusion** : les limites du scénario, la question de la gravité quantique et la perspective d'un univers régi par une unique symétrie initiale.

2 Enoncé du Théorème « Nous ne sommes qu'un »

Théorème (Nous ne sommes qu'un). *Il existe une formulation unifiée de la physique, représentée par une unique action U , où la relativité générale et les champs de jauge ne forment qu'un seul et même cadre à très haute énergie. Les forces fondamentales (forte, faible, électromagnétique, gravité) y apparaissent comme les différentes « facettes » d'une symétrie plus large, alors indifférenciée. L'expansion et le refroidissement de l'Univers induisent une série de brisures de symétrie, qui conduisent à la « désunification » et à la diversification des lois physiques. Malgré cette multiplicité apparente à basse énergie, toutes proviennent d'une même racine unique, d'où l'idée que « nous ne sommes qu'un ».*

Autrement dit, la séparation des forces est une conséquence dynamique d'un champ unifié primordial, dont l'état de symétrie parfaite se « casse » lors de la phase de refroidissement cosmique.

3 L'équation unifiée U

Nous présentons désormais l'action U , dont la variation $\delta U = 0$ donnera les *équations de mouvement* pour la gravité et les champs de jauge/matière [2, 4, 5].

3.1 Expression canonique

$$U = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{2\kappa^2} R(g) - \Lambda - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^A F^{\mu\nu A} + \bar{\Psi} (i \gamma^\mu D_\mu) \Psi + |D_\mu \Phi|^2 - V(\Phi) + \Delta_{\text{Yukawa}} + \dots \right] + S_{\text{corrections}}.$$

$$\text{où } \kappa^2 = 8\pi G, \quad F_{\mu\nu}^A = \partial_\mu A_\nu^A - \partial_\nu A_\mu^A + g f^{ABC} A_\mu^B A_\nu^C.$$

- $\frac{1}{2\kappa^2} R(g)$: terme d'Einstein-Hilbert (gravitation).
- Λ : constante cosmologique (ou énergie du vide).
- $-\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^A F^{\mu\nu A}$: cinétique de jauge (interactions fortes, faibles, électromagnétiques) via un groupe \mathcal{G} potentiellement unifié (SU(5), SO(10), etc.).
- $\bar{\Psi} (i \gamma^\mu D_\mu) \Psi$: représente les champs de fermions (quarks, leptons).

- $|D_\mu \Phi|^2 - V(\Phi)$: champs scalaires, responsables de la *brisure de symétrie* GUT puis plus tard électrofaible ($SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{EM}$).
- Δ_{Yukawa} : couplages fermions–Higgs pour la génération de masses.
- $S_{\text{corrections}}$: inclut des termes supplémentaires (SUSY, termes topologiques, champs d’inflaton, ...).

Lecture physique.

- *Haute énergie* : on suppose que le groupe de jauge \mathcal{G} est **non brisé**, la gravité est potentiellement **quantique**.
- *Refroidissement* : l’univers s’expande, la température chute, un champ scalaire Φ_{GUT} acquiert une valeur dans le vide (brise $\mathcal{G} \rightarrow G_1 \times G_2 \times \dots$), puis Φ_{EW} fait de même à plus basse énergie, brisant $SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{EM}$.
- *Basse énergie* : on observe alors $SU(3)_c$ (force forte), $SU(2)_L$ et $U(1)_Y$ (forces électro-faibles) — la gravité est découplée en pratique (effet extrêmement faible).

4 Chronologie de l’Univers : de l’Unité à la Désunification

Pour illustrer le « Théorème » et l’action unifiée U , passons en revue les **grandes étapes** de l’Univers [6, 7, 8].

4.1 Échelle de Planck ($t \approx 10^{-43}$ s, $E \sim 10^{19}$ GeV)

- La gravité quantique devient inévitable : fluctuations de l’espace-temps (« mousse quantique »).
- L’espace-temps peut être courbé jusqu’à des dimensions de l’ordre $l_P = \sqrt{\hbar G/c^3}$.
- *Possibilité* qu’à cette échelle, la symétrie soit *encore plus large* (ex. supergravité, M-théorie, dimensions supplémentaires).

4.2 Phase d’inflation (hypothétique, $t \approx 10^{-36} \rightarrow 10^{-32}$ s)

- Expansion exponentielle : l’univers se « gonfle ».
- L’homogénéité et l’isotropie sont accrues, tout en créant des fluctuations quantiques « gelées » à grande échelle (germe de la structure future).
- Sur le plan de l’action (1), on introduit souvent un **champ scalaire supplémentaire** (« inflaton »), $S_{\text{corrections}}$ en tient compte, sans briser la cohérence du scénario GUT.

4.3 Échelle GUT ($E \sim 10^{15-16}$ GeV)

- **Grande Unification** : $SU(3)_c, SU(2)_L, U(1)_Y$ se rassemblent dans un groupe plus grand ($SU(5), SO(10)$, etc.).
- Les quarks et leptons pourraient être dans les mêmes multiplets.

- **Brisure GUT** : un champ Φ_{GUT} (scalaire) acquiert une *valeur dans le vide* vers $\sim 10^{15-16}$ GeV.
- Sépare définitivement la force forte de la force électrofaible.
- Des bosons de jauge « X » ou « Y » massifs (non observés encore) pourraient médier la *désintégration du proton*, recherchée via des expériences spécialisées [9, 10].

4.4 Échelle électrofaible ($\approx 10^2$ GeV)

- $\text{SU}(2)_L \times \text{U}(1)_Y \rightarrow \text{U}(1)_{\text{EM}}$.
- Champ de Higgs du Modèle Standard (~ 125 GeV) : brise la symétrie électrofaible.
- Bosons W^\pm , Z^0 massifs ; le **photon** reste sans masse.
- Les fermions (quarks, leptons) acquièrent leurs masses via les couplages de Yukawa Δ_{Yukawa} .

4.5 Nucléosynthèse primordiale ($t \sim 1 \rightarrow 3$ min, $T \sim 1 \rightarrow 0.1$ MeV)

- Formation des noyaux légers (H, He, Li) par la force forte et l'interaction faible (contrôlant le taux de conversion neutron–proton).
- L'univers est alors dominé par les photons et la matière baryonique légère.

4.6 Recombinaison ($t \sim 380\,000$ ans, $T \sim 0.3$ eV)

- Les électrons se lient aux noyaux, formant des atomes neutres.
- Le **rayonnement** se découple de la matière, constituant le **fond diffus cosmologique** (CMB).

4.7 Formation des structures et apparition de la vie

- Sous l'effet de la **gravitation**, la matière se rassemble en galaxies, en étoiles.
- Les étoiles produisent par fusion thermonucléaire des éléments lourds.
- Sur des planètes, la chimie (interaction électromagnétique) permet l'émergence d'unités auto-réplicatives (la vie).
- Ainsi, *toute la diversité* (vivant, inerte, forces physiques) découle d'*un même socle unifié*.

5 Indices observationnels et validations partielles

5.1 Brisure électrofaible confirmée

- **Boson de Higgs** : découvert en 2012 (ATLAS/CMS au LHC [11, 12]), validerait le mécanisme de brisure $\text{SU}(2)_L \times \text{U}(1)_Y$.
- Mesures de précision : masses des bosons W, Z , couplages de jauge cohérents avec la brisure électrofaible.

5.2 Évolution des constantes de couplage « couplages running »

- Les mesures à haute énergie montrent que les constantes $\alpha_3, \alpha_2, \alpha_1$ *convergent* plus ou moins aux alentours $\sim 10^{15-16}$ GeV [13].
- Suggère l'existence d'une **grande unification** à cette échelle.

5.3 Pas de preuve directe de la GUT / gravité quantique

- **Non observation** de la désintégration du proton (pse $p \rightarrow e^+ \pi^0$), dont la durée de vie est supérieure à 10^{34} ans selon les expériences.
- **Gravité quantique** : aucun test direct à $\sim 10^{19}$ GeV.

Malgré cela, la *cohérence interne* du scénario, soutenue par des indices cosmologiques et particulières, pointe vers une unification à plus haute énergie.

6 Discussion et conclusion

6.1 Vers la complétude du Théorème

- *Action complète vs. scénario effectif* : l'action (1) constitue un « squelette ». Les détails exacts (choix du groupe GUT, introduction de la supersymétrie, des invariants topologiques, du champ inflaton) varient d'un modèle à l'autre.
- *Dimensions supplémentaires* : certains travaux (Kaluza-Klein, cordes) proposent une **unification géométrique** dans un espace-temps plus grand.
- *Rôle de l'inflation* : on peut l'intégrer via un champ scalaire supplémentaire dans $S_{\text{corrections}}$.

6.2 « Nous ne sommes qu'un » : la réalité d'une racine commune

Au niveau **philosophique**, cette idée révèle que :

- La *matière vivante* et la *matière inanimée* s'appuient sur les *mêmes briques* (fermions, bosons).
- Les *différentes forces* ne sont, à un certain niveau d'énergie, que *différents aspects* d'une même interaction plus fondamentale.
- L'*évolution cosmique* **brise** la symétrie originelle, créant l'« illusion » de la pluralité alors qu'à la base, tout se tient.

Conclusion : L'action unifiée (1) modélise comment *un seul cadre* — « nous ne sommes qu'un » — se « casse » en multiples lois. Le Théorème ainsi posé suggère que la séparation de la gravité et des interactions de jauge n'est qu'une *phase* d'énergie *basse*, tandis qu'à des énergies extrêmes, nous retournons à la racine unitaire.

7 Récapitulation du Théorème du Tout

Synthèse.

- **Au commencement** ($t \approx 0$), l’univers se trouverait sous le règne d’une *unique symétrie* (ou d’un groupe GUT, voire d’une sur-symétrie plus vaste incluant la gravité).
- U (Eq. 1) est l’action *unifiée* qui décrit à la fois l’Einstein-Hilbert (gravitation) et le Yang-Mills (champs de jauge), ainsi que la matière (fermions, bosons de Higgs).
- **Du fait de l’expansion et du refroidissement**, un champ scalaire Φ acquiert un v.e.v. à haute énergie ($\sim 10^{15-16}$ GeV) : \mathcal{G} se brise ($\text{GUT} \rightarrow \text{SU}(3)_c \times \text{SU}(2)_L \times \text{U}(1)_Y$).
- **Plus tard** ($\sim 10^2$ GeV), la symétrie électrofaible se brise à son tour ($\text{SU}(2)_L \times \text{U}(1)_Y \rightarrow \text{U}(1)_{\text{EM}}$).
- **À basse énergie** ($\ll 100$ GeV), on observe 4 forces distinctes, mais elles sont enracinées dans la *même action unifiée*.

Conclusion. Le « Théorème du Tout » tient en cette phrase : “*Nous ne sommes qu’un*”. Toutes les entités du monde physique (matière, lumière, gravité, champs) proviennent d’un unique *champ unifié primordial*. Les différenciations et la complexité du présent (de la structure galactique à la vie) résultent de la **brisure séquentielle** de cette symétrie initiale, au fil de l’histoire cosmique.

« Nous ne sommes qu’un » : tout résulte d’une même structure unifiée,
se différenciant au cours de l’histoire cosmique.

Remerciements et perspectives

Ce scénario, bien que partiellement *théorique*, offre une vision **intégrée** entre la cosmologie primordiale et la physique des hautes énergies. Il reste à le **tester** (désintégration du proton, signatures directes de gravité quantique, etc.) et à le **compléter** (inflation, neutrinos, matière noire, énergie sombre). Cependant, la *cohérence interne* et les indices observationnels appuient l’idée que l’unité n’est pas un vain mot, mais bien un **principe directeur** de la nature.

Références

- [1] A. Einstein, *Die Feldgleichungen der Gravitation (The Field Equations of Gravitation)*, Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1915.
- [2] S. Weinberg, *The Quantum Theory of Fields*, Cambridge University Press, 1995.
- [3] A. Zee, *Quantum Field Theory in a Nutshell*, Princeton University Press, 2010.
- [4] H. Georgi & S. L. Glashow, “Unity of All Elementary-Particle Forces,” *Phys. Rev. Lett.*, 32, 438–441, 1974.
- [5] P. Langacker, “Grand Unified Theories and Proton Decay,” *Phys. Rept.*, 72, 185–385, 1981.
- [6] E. W. Kolb & M. S. Turner, *The Early Universe*, Addison-Wesley, 1990.

- [7] A. G. Riess et al., “Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant,” *The Astronomical Journal*, 116 :1009–1038, 1998.
- [8] Planck Collaboration, “Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters,” *Astronomy & Astrophysics*, **641**, A6, 2020.
- [9] Super-Kamiokande Collaboration, <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/>.
- [10] KamLAND Collaboration, <http://www.awa.tohoku.ac.jp/kamland/>.
- [11] ATLAS Collaboration, “Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC,” *Phys. Lett. B*, 716, 1–29, 2012.
- [12] CMS Collaboration, “Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC,” *Phys. Lett. B*, 716, 30–61, 2012.
- [13] U. Amaldi, W. de Boer, & H. Fürstenau, “Comparison of grand unified theories with electroweak and strong coupling constants measured at LEP,” *Phys. Lett. B*, 260(3-4), 447–455, 1991.