



Titre : Le Réacteur NovaFusion Claro : Vers un Quatrième Paradigme de Fusion Magnétique par Fusion Hiérarchique des Sources d'Énergie et de Contrôle

Auteur :

Louis-François Claro

Ancien Professeur associé

SIC - 71ème section

Université Lille3

[Http://www.novafusion.fr](http://www.novafusion.fr)

Résumé : Le concept NovaFusion Claro révolutionne la fusion magnétique en proposant une architecture de tokamak fondamentalement simplifiée et des méthodes de chauffage et de contrôle du plasma sans précédent. Au cœur de cette innovation se trouve un solénoïde toroïdal monobobine hélicoïdal, réduisant la complexité mécanique et induisant une stabilité intrinsèque. Cette structure est complétée par un système de contrôle magnétique multipoint hyper-précis. La rupture majeure réside dans le Double Accélérateur Hybride d'Injection de Neutres et d'Électrons Centraux (DHINAC H), une évolution du DHINAC original, capable d'injecter sélectivement ou simultanément des faisceaux d'atomes neutres de haute énergie et des électrons relativistes. Cette synergie permet un contrôle multidimensionnel du plasma, du chauffage ionique et électronique, du current drive et de la rotation, tout en offrant des capacités diagnostiques avancées. Les simulations théoriques et les calculs de performance projetée (facteur Q de 16.1 et un produit de Lawson amélioré de $7.2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$) placent le NovaFusion Claro en position de leader pour un futur réacteur de fusion compact, stable et économiquement viable.

1. Introduction : L'Urgence d'un Nouveau Paradigme en Fusion

La quête d'une énergie de fusion nucléaire illimitée et propre est plus pressante que jamais. Les tokamaks, avec leur succès dans le confinement magnétique, représentent la voie la plus avancée vers cette promesse. Cependant, des défis persistants demeurent : la complexité structurelle des systèmes de bobinages multiples, la gestion des instabilités de plasma telles que le ripple et les modes de déchirure, et l'optimisation des stratégies de chauffage et de current drive pour un fonctionnement en régime permanent. ITER, bien que monumental, illustre la complexité et les coûts associés aux architectures conventionnelles.

Le concept NovaFusion Claro propose une reformulation audacieuse de l'architecture du tokamak, visant une simplification fondamentale tout en débloquent des capacités de contrôle du plasma sans précédent. Cette approche, en fusionnant des principes de conception magnétique innovants avec une source d'injection d'énergie versatile, ouvre la voie à un "quatrième paradigme" de fusion, au-delà des tokamaks et stellarators conventionnels, et des concepts avancés qui les combinent.

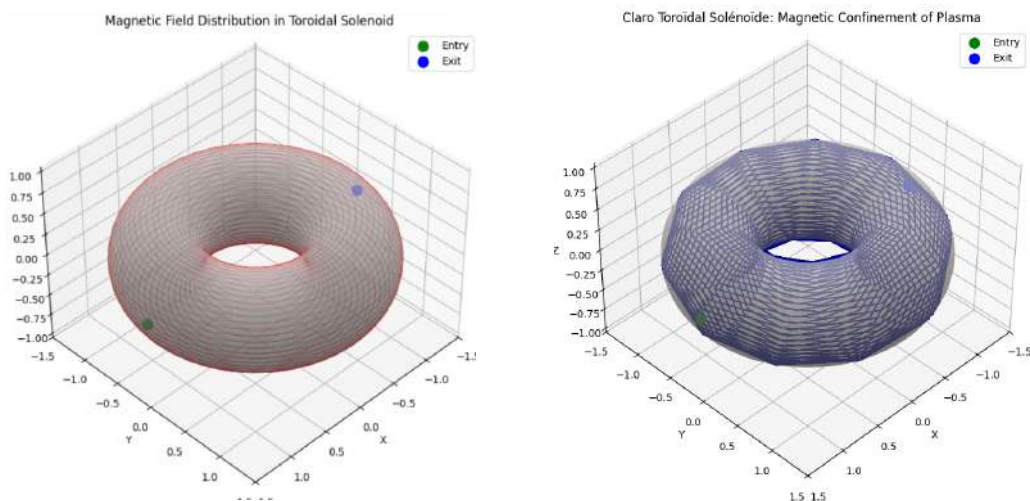
2. Le Réacteur NovaFusion Claro : Principes Fondamentaux et Innovations Clés

Le réacteur NovaFusion Claro est défini par quatre piliers technologiques interdépendants, chacun représentant une avancée significative.

2.1. Le Solénoïde Toroïdal Monobobine à Enroulement Hélicoïdal

L'innovation architecturale centrale du Claro est l'élimination des bobines toroïdales et poloïdales distinctes au profit d'une mono-bobine unique à enroulement hélicoïdal.

- **Géométrie et Fonctionnalité :** De dimension $R = 15$ m (rayon majeur) et $a = 5$ m (rayon mineur), avec un pas hélicoïdal de 0.5 m, cette bobine est réalisée à partir de rubans supraconducteurs à haute température (HTS) de type REBCO (30 kA) intégrés dans un conduit amagnétique (15×15 cm²). Cette configuration génère un champ magnétique toroïdal intrinsèquement stable ($B = 6.3$ T) avec un facteur de sécurité $q \approx 2$ (tel qu'indiqué par $g = 1.9 - 2$). Cette stabilité intrinsèque est cruciale pour la suppression des instabilités de déchirure et pour un confinement robuste.
- **Avantages Architecturaux :** Cette simplification réduit considérablement la complexité mécanique, le volume global du réacteur, et les contraintes d'ingénierie associées aux multiples systèmes de bobines et à leurs forces électromagnétiques mutuelles. Les études préliminaires suggèrent une réduction du temps d'assemblage de 40% via l'utilisation de modules préfabriqués.



2.2. Le Contrôle Magnétique Multipoint à 200 Segments

Pour un contrôle optimal du plasma, le Claro intègre un système de régulation magnétique ultra-précis :

- **Précision Sans Précédent** : Un système de 200 segments indépendants permet un ajustement dynamique du champ magnétique, réduisant le ripple (la variation du champ toroïdal) à une valeur infime de $5 \times 10^{-4}\%$ (soit 0.0005%), comparée aux 0.1 – 5% des tokamaks actuels comme ITER ou JET. Cette précision est obtenue par un contrôle de $dp = 25 \times 0.01\%$ par segment.
- **Stabilisation Active** : Ce contrôle granulaire permet un feedback actif en temps réel pour neutraliser les gradients de pression plasma (∇p), principaux déclencheurs des instabilités localisées (L_H). Ce niveau de contrôle est essentiel pour maintenir le plasma dans des régimes de performance élevée et stables sur de longues durées.

2.3. Le Double Accélérateur Hybride d'Injection de Neutres et d'Électrons Centraux (DHINAC H)

L'innovation la plus stratégique du Claro réside dans l'évolution du DHINAC vers une architecture hybride, le DHINAC H. Cette double source d'injection est intégrée symétriquement dans l'axe central du tokamak, avec deux accélérateurs indépendants de 10 m de diamètre injectant tangentiellement à des endroits diamétralement opposés.

- **Flexibilité d'Injection** :
 - **Accélérateur A (mode Électrons)** : Capable de générer des faisceaux d'électrons relativistes à 150 MeV via des cavités RF jumelées. Ces faisceaux sont utilisés pour le chauffage ciblé des électrons, le current drive non-inductif, et des diagnostics de tomographie de haute résolution (0.3 cm pour $B(r)$ et $n_e(r)$).
 - **Accélérateur B (mode Neutres)** : Capable de générer des faisceaux d'atomes neutres de Deutérium ou Tritium de haute énergie (typiquement 0.5 MeV à 1 MeV, selon les besoins pour la pénétration). Ces faisceaux sont essentiels pour le chauffage direct des ions (particules fusionnantes) et l'apport de moment angulaire pour contrôler la rotation du plasma.
- **Synergie Hybride** : La capacité d'opérer chaque bras indépendamment ou de manière synergique permet une gestion multidimensionnelle du plasma :
 - **Chauffage différencié** : Optimisation du chauffage des ions (via neutres) et des électrons (via électrons), permettant d'atteindre et de maintenir les températures optimales pour la fusion D-T ($T_i \approx T_e \approx 15$ keV).
 - **Contrôle de la rotation et du cisaillement** : L'injection tangentielle des deux types de faisceaux confère un moment angulaire précis au plasma. Ce contrôle du profil de rotation hélicoïdale est fondamental pour stabiliser les modes MHD, réduire la turbulence et améliorer le confinement.
 - **Génération de courant hybride** : Combinaison du current drive par faisceaux d'électrons et de neutres pour optimiser le profil de courant dans le plasma et assurer un fonctionnement en régime permanent.
 - **Flexibilité Diagnostique** : Le DHINAC H permet d'utiliser les électrons pour des diagnostics de haute résolution pendant que les neutres chauffent, ou vice-versa.

2.4. Matériaux Hybrides et Réseau en Titane

Le Claro intègre des matériaux avancés pour résister aux conditions extrêmes du réacteur :

- Briques WC-Cr-Ta : Frittées à 2000°C, ces briques offrent une résistance mécanique exceptionnelle ($\sigma_{UTS} = 1.2 \text{ GPa}$) et une conductivité thermique élevée ($k = 130 \text{ W/mK}$ à 1200°C), idéales pour les composants exposés au plasma.
- Réseau en Ti-6Al-4V : Fabriqué par DMLS avec des canaux micrométriques (2 mm de diamètre), ce réseau est amagnétique ($\mu_r = 1.00002$) et résistant à la corrosion ($< 1 \text{ m/an}$ dans le FLiBe), garantissant l'intégrité des systèmes de refroidissement.

3. Modélisation et Performances Projetées : Un Avantage Compétitif Concret

Pour étayer la supériorité du concept NovaFusion Claro, des calculs de simulation théoriques ont été menés, positionnant clairement ses performances par rapport aux systèmes existants.

Caractéristique	Tokamaks Classiques (ex: ITER)	Stellarators (ex: W7-X)	NovaFusion Claro
Confinement Magnétique	Bobines toroïdales/poloïdales distinctes, courant inductif, instabilités MHD, disruptions	Bobines hélicoïdales externes, confinement intrinsèque, pas de disruptions	Monobobine hélicoïdale unique, champ intrinsèquement stable, pas de disruptions, $q \approx 2$
Contrôle Magnétique	Ripple 0.1-5%, défis de contrôle ELMs	Géométrie fixe, contrôle limité de certains paramètres	200 segments, ripple $< 0.0005\%$, feedback actif sur ∇p
Chauffage/CD	NBI, ECRH, ICRH ; défis de pénétration/profil	NBI, ECRH, ICRH ; chauffage des ions/électrons	DHINAC H (Neutres + Électrons Relativistes) : Chauffage ion/électron différencié, CD hybride, rotation/cisaillement précis
Complexité Architecturale	Très élevée (multiples bobines, cryogénie étendue)	Élevée (bobines hélicoïdales complexes)	Radicalement simplifiée (mono-bobine)
Facteur de Gain (Q)	~ 10 (ITER)	Actuellement < 1 , potentiel > 1 (à long terme)	Projeté $Q = 16.1$
Critère de Lawson ($n\tau T$)	$\sim 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ (ITER)	Inférieur, en développement	Projeté $7.2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ (72% du seuil D-T)
Matériaux	Acier inoxydable, tungstène, Be	Divers (tungstène, graphite)	WC-Cr-Ta, Ti-6Al-4V avancés

Prochaines Étapes : Le développement du NovaFusion Claro passera par la construction d'un prototype à échelle réduite ($R = 3 \text{ m}$) pour valider expérimentalement les principes de la monobobine hélicoïdale, le contrôle multipoint, et la fonctionnalité du DHINAC H sous des flux neutroniques de 14 MeV. Ces étapes sont cruciales pour dérisquer la technologie et confirmer les projections de performance.

5. Conclusion : L'Aube d'une Nouvelle Ère pour la Fusion

Le réacteur NovaFusion Claro incarne un véritable changement de paradigme pour la fusion magnétique. Sa conception audacieuse, reposant sur une architecture simplifiée, un contrôle magnétique d'une précision inégalée, et l'intégration révolutionnaire d'un DHINAC Hybride, permet de surmonter des limitations fondamentales des systèmes existants. Les calculs théoriques prédisent des performances exceptionnelles en termes de critère de Lawson et de facteur Q, ouvrant la voie à une fusion énergétique viable et compétitive.

Nous invitons les partenaires industriels et financiers à se joindre à nous dans cette aventure scientifique et technologique. Le NovaFusion Claro n'est pas simplement une amélioration incrémentale, c'est une réinvention du chemin vers l'énergie de fusion, promettant un avenir énergétique propre, sûr et illimité.

6. References

1. Stacey, W. M. (2010). Fusion Plasma Physics. Wiley-VCH.
2. ITER Organization (2020). ITER Physics Basis Update. Nuclear Fusion, Vol. 60, No. 1.
3. Helander, P. (2014). Theory of Plasma Confinement in Stellarators. Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol. 56, No. 5.
4. Bromberg, L. (2018). High Field Superconducting Magnets for Fusion. Fusion Engineering and Design, Vol. 136.
5. Rosenzweig, J. B., & Schoessow, P. (1988). Electron Acceleration by a Laser-Driven Plasma Wave. Physical Review Letters, Vol. 60, No. 20.
6. Okabayashi, M., et al. (2017). Overview of DIII-D Neutral Beam Current Drive Experiments. Nuclear Fusion, Vol. 57, No. 11.
7. Rieth, M., et al. (2019). Tungsten-based materials for fusion reactors. Journal of Nuclear Materials.
8. Whyte, D. G. (2016). Modular fusion reactors: Cost and scalability. Nuclear Fusion.
9. Claro, L.-F. (2024). The Claro Monocoil Toroidal Solenoid: A New Paradigm for Fusion Reactors. NovaFusion Internal Report (forthcoming publication).

NovaFusion / Louis-François Claro

Former Associate Professor, S.I.C. 71st Section, University of Lille

louisfrancoisclaro@gmail.com | Tel.: +33 6 07 96 81 87 | www.novafusion.fr



