

Ondes gravitationnelles de basses fréquences et relativité numérique

Jérôme Novak

LUTH : Laboratoire de l'Univers et de ses THéories

CNRS / Université Paris 7 / Observatoire de Paris

F-92195 Meudon Cedex, France

<http://www.luth.obspm.fr/>

En collaboration avec

Silvano Bonazzola, Dorota Gondek, Éric Gourgoulhon, Christian Klein et Loïc Villain.

1. Sources d'ondes gravitationnelles à basses fréquences
2. Systèmes binaires de trous noirs massifs
3. Techniques numériques
4. Simulations
5. Conclusions

Sources d'ondes gravitationnelles basses fréquences

- fond cosmologique
- binaires de trous noirs massifs
- autres systèmes d'astres binaires

Les sources astrophysiques doivent être éloignées de la symétrie sphérique et dans la bonne gamme de fréquences: entre 10^{-4} et 1 Hz.

$$P \sim 3.2 \times 10^4 \left(\frac{2GM}{R_{\odot} c^2} \right)^{3/2} \left(\frac{M_{\odot}}{2M} \right)^{1/2} \text{ s}$$

Binaires de type stellaire

La séparation doit être inférieure à R_{\odot} : naines blanches, étoiles à neutrons et trous noirs de type stellaire; éventuellement, étoiles de la séquence principale.

- sources moins puissantes que les binaires de trous noirs massifs;
- mais il existe des binaires déjà observées qui seraient détectables par LISA.
(par ex. meilleure mesure de la masse du graviton, Cutler, Hiscock & Larson *gr-qc/0209101*)

Il est même possible que les systèmes binaires de naines blanches forment un “fond continu” en dessous de 10^{-3} Hz (Ungarelli & Vecchio, *Phys. Rev. D***64**, 121501 (2001)).

Trous noirs galactiques

C'est LA source attendue pour LISA:

- la coalescence de deux TNM pourrait être détectée jusqu'à des distances cosmologiques (Hughes, *MNRAS* **331** p. 805 2002);
- leur formation serait aussi une source potentielle;
- l'accrétion d'autres astres compacts donnera des informations sur le champ gravitationnel (par ex. Scharre & Will, *Phys. Rev. D* **65**, 042002 (2002)).

Dans tous les cas, il faut avoir un "catalogue" de formes d'ondes, comme pour les détecteurs au sol.

⇒ *Relativité numérique*

Méthodes spectrales

Méthodes spectrales: représentation d'un champ physique u par une autre fonction $I u$.

Si $(\varphi_0, \dots, \varphi_N)$ est une famille de fonctions orthogonales, alors l'approximation de u est donnée par:

$$P u = \sum_{n=0}^N \tilde{u}_n \varphi_n.$$

Les coefficients $(\tilde{u}_0, \dots, \tilde{u}_N)$ sont obtenus par le produit scalaire de u avec les fonctions:

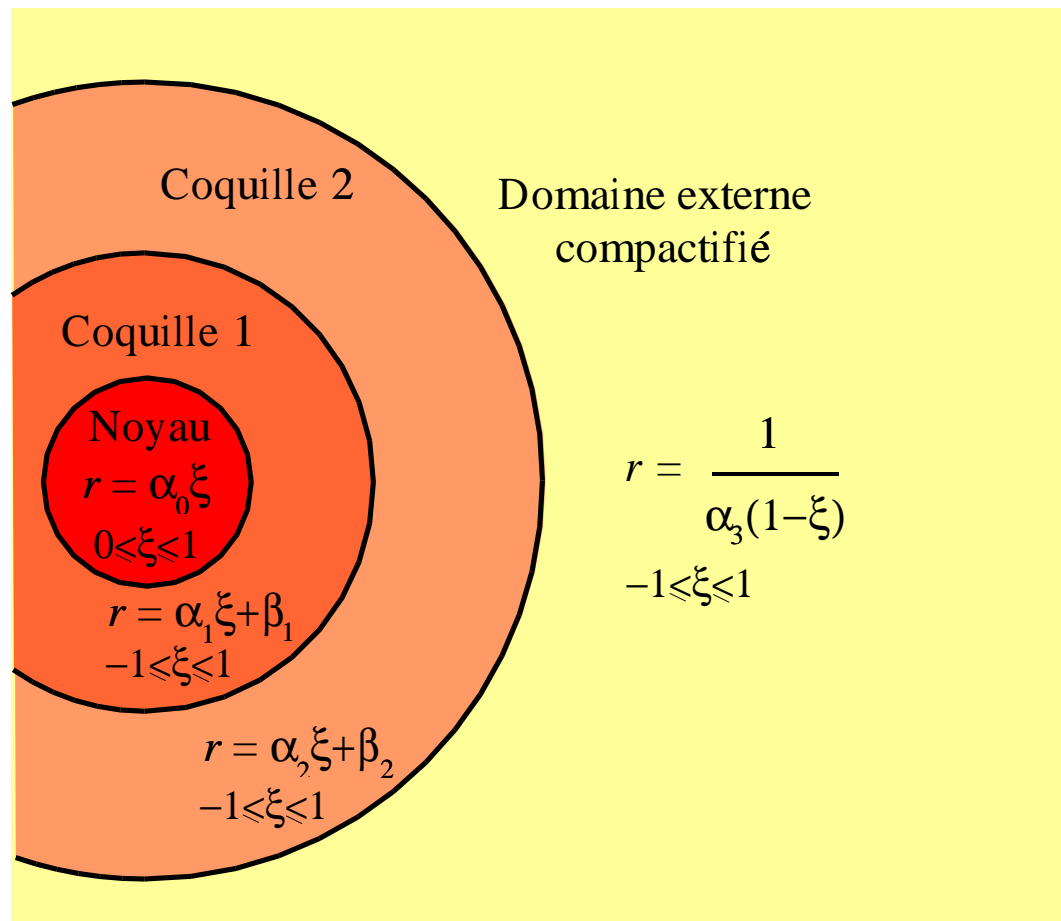
$$\tilde{u}_n = \langle u, \varphi_n \rangle.$$

Différences finies: représentation d'un champ physique u par un tableau fini de nombres: les valeurs (u_1, \dots, u_n) prises par u aux points de la grille (x_1, \dots, x_n) .

Cette différence — fonction/nombres — explique pourquoi les méthodes spectrales sont d'habitude beaucoup plus précises que les méthodes aux différences finies.

Décomposition sur plusieurs domaines

Les méthodes spectrales à plusieurs domaines permettent de décrire la surface des étoiles à neutrons, ainsi que d'imposer les bonnes conditions à l'infini (seul endroit où elles sont bien définies en relativité générale).

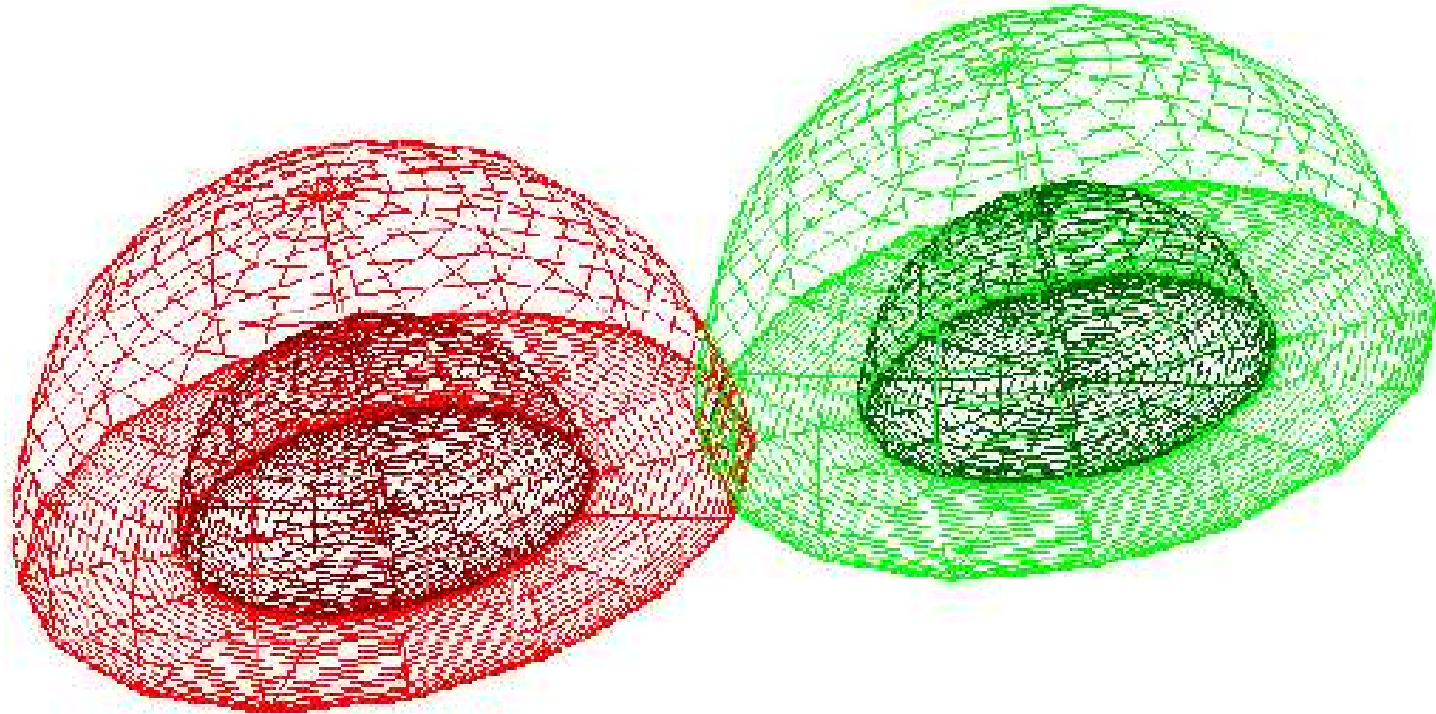


coordonnées physiques

$$(r, \theta, \varphi)$$

coordonnées numériques

$$(\xi, \theta, \varphi)$$

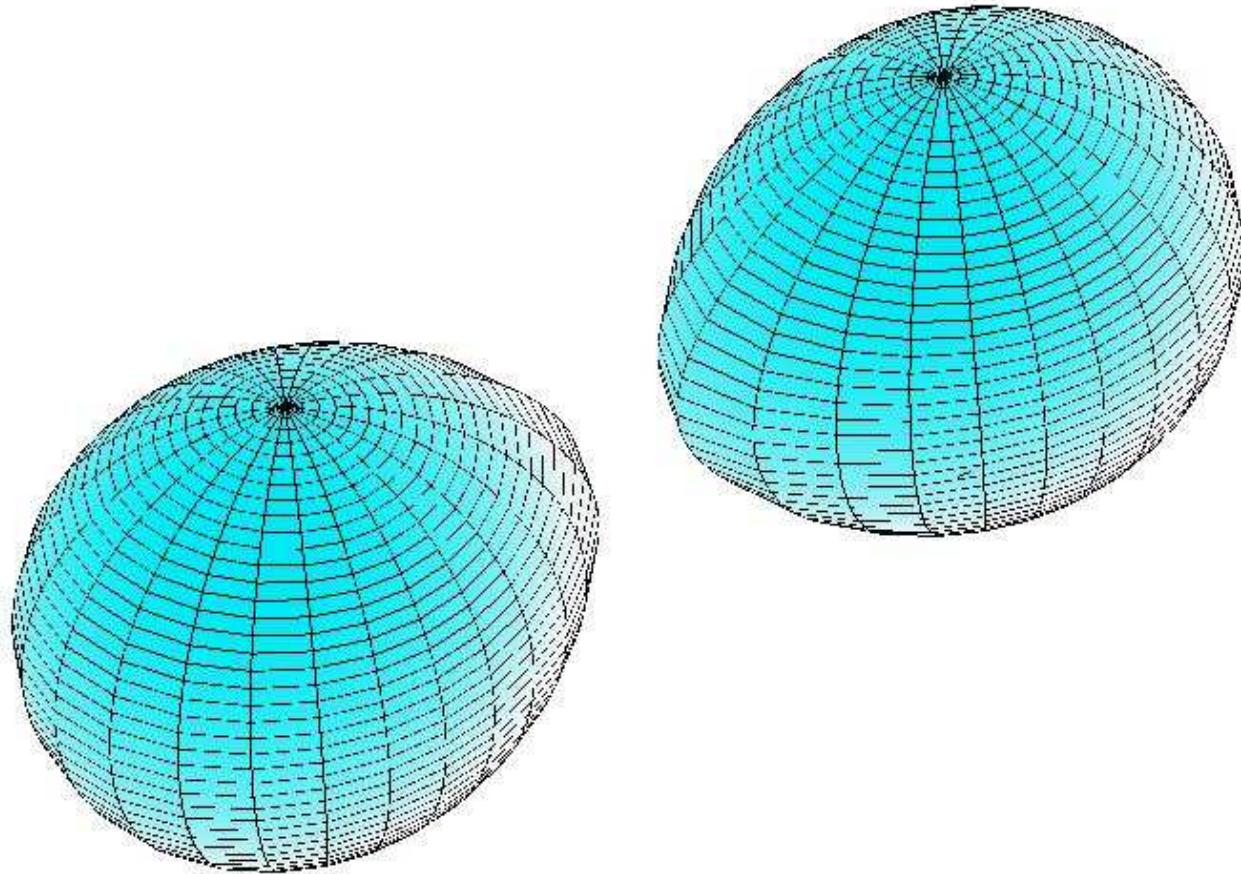


Possibilité d'adapter les grilles à la surface des étoiles par le mapping suivant:

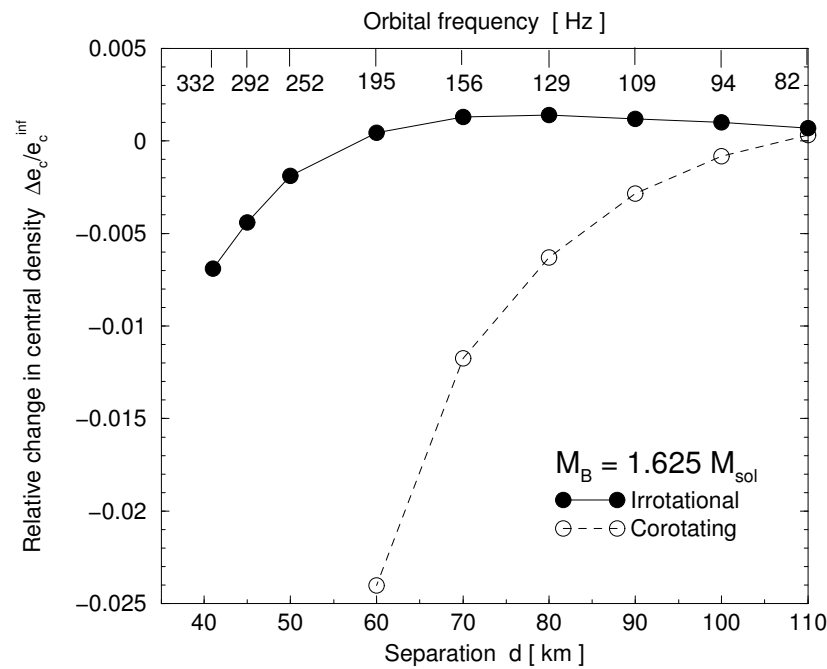
$$r = \alpha[\xi + A(\xi)F(\theta', \varphi') + B(\xi)G(\theta', \varphi')] + \beta, \quad \theta = \theta', \quad \varphi = \varphi'$$

Résultats de simulations – binaires d'étoiles à neutrons

Approximation quasi-stationnaire (pas de rayonnement gravitationnel).



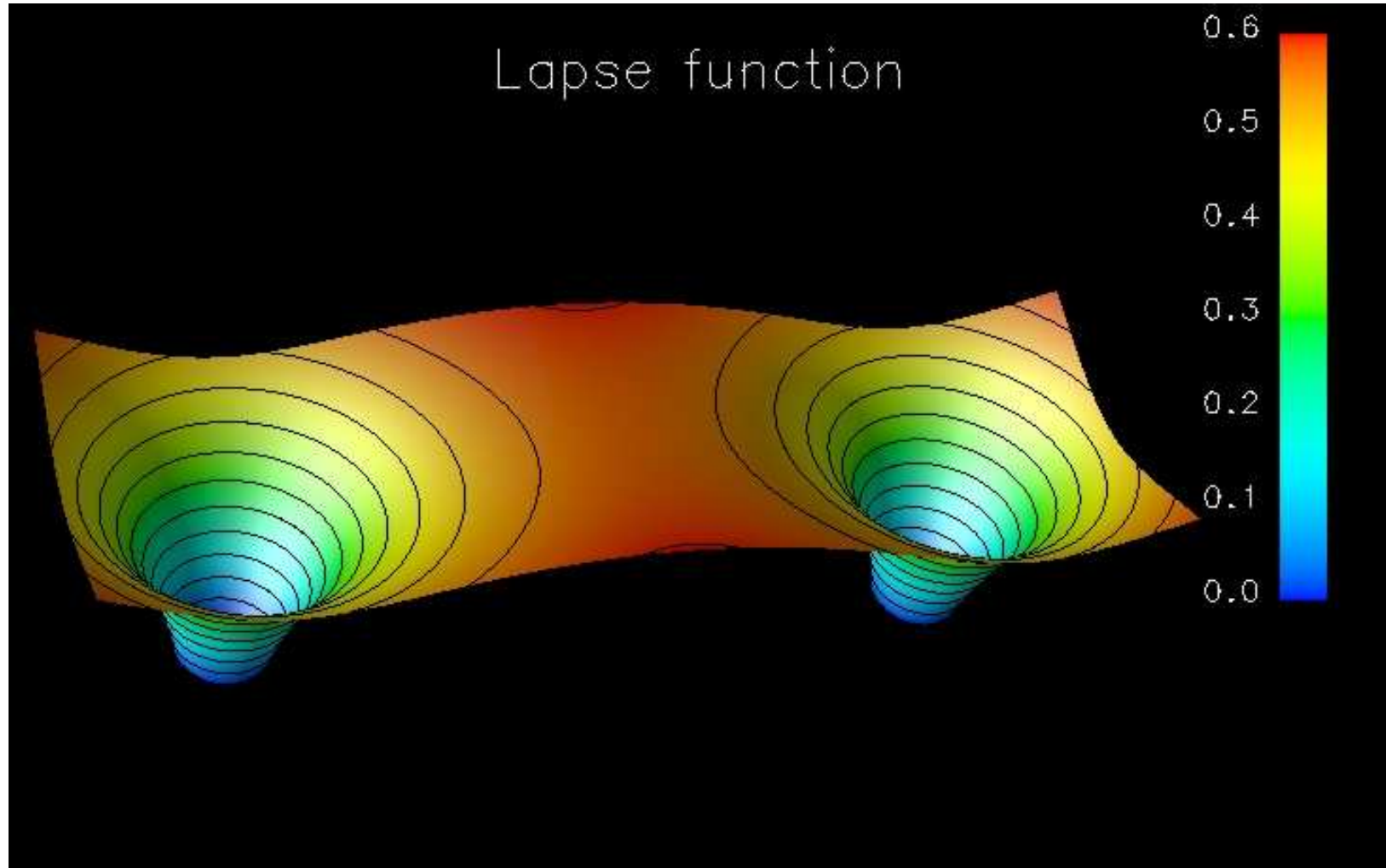
Étude de différentes équations d'état.

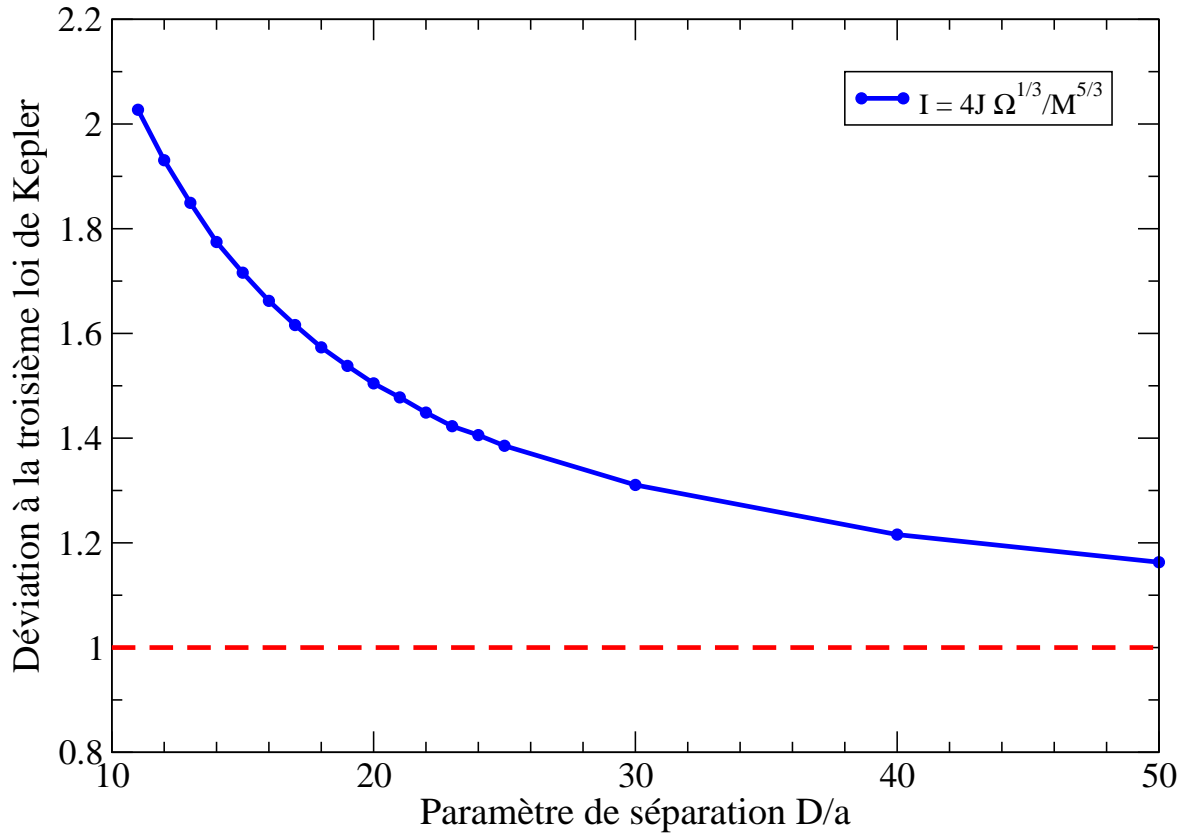


⇒ Il n'y a pas effondrement des étoiles à neutrons (en trou noir) avant leur rencontre.

Résultats de simulations – binaires de trous noirs

Approximation quasi-stationnaire (pas de rayonnement gravitationnel).





⇒ On retrouve la troisième loi de Kepler pour de grandes séparations des trous noirs.

⇒ La position de la dernière orbite stable est en bon accord avec l'estimation analytique (développements post-newtoniens d'ordre élevé).

Conclusions

- Avec LISA, on peut espérer un grand rapport $S/N \Rightarrow$ beaucoup d'informations physiques et astrophysiques disponibles.
- Certaines sources ont déjà été indentifiées dans le spectre électromagnétique.
- La modélisation de signaux fiables est une nécessité pour inverser les signaux.
- Il reste beaucoup à faire: les simulations sont toujours incomplètes.
- L'étude des sources potentielles sort du domaine strict de la "relativité numérique" (fréquences plus faibles).