



**HAL**  
open science

## Modélisation hybride RANS/LES : du formalisme aux applications

Remi Manceau

### ► To cite this version:

Remi Manceau. Modélisation hybride RANS/LES : du formalisme aux applications. Atelier sur la représentation des fines échelles océaniques dans les simulations numériques, Oct 2024, Plouzané, France. ⟨hal-04733173⟩

**HAL Id: hal-04733173**

**<https://inria.hal.science/hal-04733173v1>**

Submitted on 11 Oct 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

# Modélisation hybride RANS/LES

Du formalisme aux applications

RÉMI MANCEAU  
DR CNRS

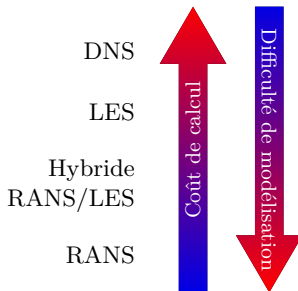


*Laboratoire de mathématiques et de leurs applications de Pau (LMAP)  
UMR 5142 CNRS-Université de Pau  
Équipe-projet Inria Cagire*

Atelier sur la représentation des fines échelles océaniques  
dans les Simulations Numériques  
Plouzané, 9-11 octobre 2024

## Contexte

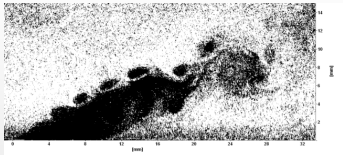
- ✓ Écoulements turbulents :
  - ▷ Compromis coût/précision
  - ▷ Choix cruciaux : modèle + méthodes numériques



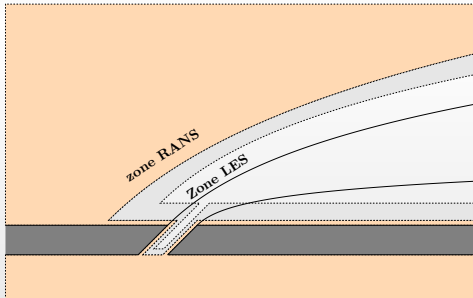
- ✓ Industrie : insuffisance modèles statistiques (RANS) + coûts prohibitif LES
  - ▷ Approche combinant les avantages des 2 types de modèles : **hybride RANS/LES**

# Principe de l'hybride RANS/LES

## Objectif



Banc MAVERIC

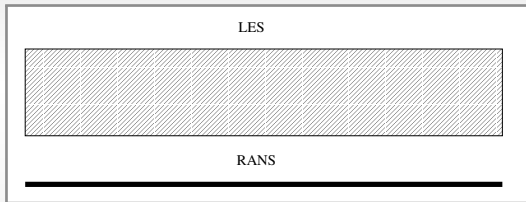


Hybride RANS/LES  $\simeq$  approche multi-échelles

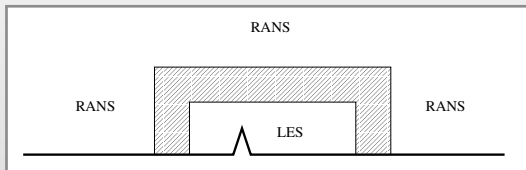
# Principe de l'hybride RANS/LES

## Modes d'utilisation

WALL-MODELED LES



EMBEDDED LES



## Enjeux théoriques

✓ Le modèle tend vers :

- ▷ Un modèle pour le tenseur de Reynolds (RANS) dans certaines régions  
⇒ Valeurs élevées des tensions (ou de la viscosité turbulente)
- ▷ Un modèle pour le tenseur de sous-maille (LES) dans d'autres régions  
⇒ Valeurs faibles des tensions (ou de la viscosité turbulente)

✓ Types de modèles

- ▷ Basé sur un blending d'un modèle RANS et d'un modèle LES
- ▷ Basé sur un modèle RANS modifié pour tendre vers un modèle LES

Paramètres basés sur des indicateurs locaux de résolution (taille de maille, échelles turbulentes, propriétés de l'écoulement moyen)

✓ Propriétés communes des modèles hybrides RANS/LES usuels : définition ambiguë des variables résolues dans la région de transition

LES = filtre spatial      RANS = moyenne statistique

- ⇒ Raccorder continûment les deux méthodes : comment ?
- ⇒ Inconsistance fondamentale

## Exemple : Detached Eddy Simulation (DES)

Version basée sur un modèle à 2 équations (Travin et al., 2002)

RANS

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$\frac{dk}{dt} = P - \varepsilon + D$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} - D_\varepsilon$$

DES

$$\nu_t^{\text{sfs}} = C_\mu \frac{k_{\text{sfs}}^2}{\varepsilon_{\text{sfs}}}$$

$$\frac{dk_m}{dt} = P_{\text{sfs}} - \frac{k_{\text{sfs}}^{3/2}}{L} + D_{\text{sfs}}$$

$$\frac{d\varepsilon_{\text{sfs}}}{dt} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon_{\text{sfs}}}{k_{\text{sfs}}} P_{\text{sfs}} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon_{\text{sfs}}^2}{k_{\text{sfs}}} - D_{\varepsilon_{\text{sfs}}}$$

$$\checkmark L = \min \left( \frac{k_{\text{sfs}}^{3/2}}{\varepsilon_{\text{sfs}}}, C_{\text{des}} \Delta \right)$$

$$\triangleright \text{Zone RANS : } L = \frac{k_{\text{sfs}}^{3/2}}{\varepsilon_{\text{sfs}}} \Rightarrow \frac{k_{\text{sfs}}^{3/2}}{L} = \varepsilon_{\text{sfs}} \Rightarrow \text{modèle RANS}$$

$$\triangleright \text{Zone LES : } L = C_{\text{des}} \Delta \Rightarrow \frac{k_{\text{sfs}}^{3/2}}{L} = \frac{k_{\text{sfs}}^{3/2}}{C_{\text{des}} \Delta} \Rightarrow \nu_t^{\text{sfs}} \text{ petit} \equiv \text{modèle de sous-maille}$$

✓ Pas de formalisme défini

# Plan de la présentation

## 1 Comment définir un formalisme pour l'hybride RANS/LES ?

- ▷ Motivations et objectifs
- ▷ Formalismes possibles
- ▷ Filtrage temporel

## 2 Modélisation des tensions non-résolues

- ▷ Équations filtrées
- ▷ T-PITM
- ▷ HTLES
- ▷ Exemples d'applications

## 3 Approche active

- ▷ La perte d'énergie mécanique
- ▷ Injection d'énergie par forçage volumique
- ▷ Applications

## 4 Conclusions

# Plan de la présentation

## 1 Comment définir un formalisme pour l'hybride RANS/LES ?

- ▷ Motivations et objectifs
- ▷ Formalismes possibles
- ▷ Filtrage temporel

## 2 Modélisation des tensions non-résolues

- ▷ Équations filtrées
- ▷ T-PITM
- ▷ HTLES
- ▷ Exemples d'applications

## 3 Approche active

- ▷ La perte d'énergie mécanique
- ▷ Injection d'énergie par forçage volumique
- ▷ Applications

## 4 Conclusions

## Motivation

### Pourquoi un formalisme est-il souhaitable ?

- ✓ Question de principe : définir sans ambiguïté les variables et les équations
- ✓ Enjeu de modélisation : quels sont les termes à modéliser, en particulier dans la zone grise (ni RANS, ni LES, entre les deux)
- ✓ Comparaisons poussées avec les données expérimentales/DNS (besoin de filtrer les données)
- ✓ Comprendre la physique des écoulements

# Objectifs

$$\checkmark \mathbf{u} = \underbrace{\bar{\mathbf{u}}}_{\text{Champ résolu}} + \underbrace{\mathbf{u}'}_{\text{Champ non-résolu}}$$

▷ RANS : moyenne statistique

LES : filtre passe bas

✓ Équations de Navier–Stokes

▷  $\frac{\partial u_i}{\partial t} = \mathcal{F}(u_i, p)$

▷ Décomposition  $\Rightarrow \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = \mathcal{F}(\bar{u}_i, \bar{p}) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$  with  $\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$

▷ RANS :  $\tau_{ij}$  = tenseur de Reynolds

LES :  $\tau_{ij}$  = tenseur de sous-maille

✓ Objectifs

▷ Définir un opérateur raccordant les deux approches

▷ Modéliser le  $\tau_{ij}$  obtenu pour qu'il tende vers le tenseur de Reynolds (RANS) dans certaines régions et vers le tenseur de sous-maille (LES) dans d'autres

## Formalismes possible pour l'hybride RANS/LES

### Filtre additif (Germano, 2004)

- ✓  $\tilde{\mathbf{u}}^{\text{hyb}} = \alpha \tilde{\mathbf{u}}^{\text{les}} + (1 - \alpha) \bar{\mathbf{u}}$ 
  - $\tilde{\mathbf{u}}^{\text{les}} =$  filtre spatial usuel
  - $\bar{\mathbf{u}} =$  moyenne de Reynolds (statistique)
- ✓ Peut être invoqué pour toutes les approches à 2 modèles
  - ▷ Approches dites *zonales* (2 sous-domaines discontinus)
  - ▷ Approches dual-mesh
  - ▷ Approches stress-blending: DHRL, SBES, Xiao's
- ✓ Exemple : DHRL

$$\tau_{ij} = \alpha \tau_{ij}^{\text{les}} + (1 - \alpha) \tau_{ij}^{\text{rans}}$$

$$\text{où } \alpha = \frac{P^{\text{res}}}{P^{\text{rans}} - P^{\text{les}}}$$

### Filtre temporel (Fadai-Ghotbi, Friess, Manceau, Gatski, and Borée, 2010b)

- ✓  $\tilde{\mathbf{u}}^{\text{hyb}} = \tilde{\mathbf{u}}^{\text{les}}$  avec une taille de filtre qui tend vers l'infini en zone RANS
- ✓ Peut être invoqué pour toutes les approches à 1 modèle (stress-damping) : DES, SAS, PANS, FSM, STRUCT, *etc.*

## Filtrage temporel

- ✓ Filtre spatio-temporel général (Kampé de Fériet and Betchov, 1951)

$$\tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t) = \int_{\mathcal{D}} \int_{-\infty}^t G(\mathbf{x}, \mathbf{x}', t, t') \mathbf{u}(\mathbf{x}', t') d\mathbf{x}' dt'$$

- ✓ Filtre spatial (LES classique) :  $G(\mathbf{x}, \mathbf{x}', t, t') = G_S(\mathbf{x}, \mathbf{x}')\delta(t - t')$

$$\tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t) = \int_{\mathcal{D}} \int_{-\infty}^t G_S(\mathbf{x}, \mathbf{x}')\delta(t - t')\mathbf{u}(\mathbf{x}', t') d\mathbf{x}' dt' = \int_{\mathcal{D}} G_S(\mathbf{x}, \mathbf{x}')\mathbf{u}(\mathbf{x}', t) d\mathbf{x}'$$

- ✓ Filtre temporel eulerien (TLES, Pruett, 2000; Pruett et al., 2003):

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{x}', t, t') = \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}')G_T(t, t')$$

$$\tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t) = \int_{\mathcal{D}} \int_{-\infty}^t \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}')G_T(t, t')\mathbf{u}(\mathbf{x}', t') d\mathbf{x}' dt' = \int_{-\infty}^t G_T(t, t')\mathbf{u}(\mathbf{x}, t') dt'$$

# Intérêt du filtrage temporel pour l'hybride RANS/LES

✓ Formalisme spatial : pas valide en turbulence inhomogène

▷ Turbulence homogène ( $\bar{\mathbf{u}}$  indépendant de  $\mathbf{x}$ ):  $\bar{\mathbf{u}}(t) = \lim_{\Delta_s \rightarrow \infty} \tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t)$

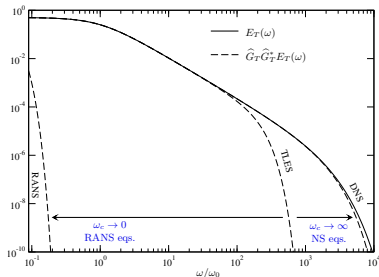
▷ Turbulence inhomogène :  $\bar{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t) = \lim_{\Delta_s \rightarrow \infty} \tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t)$

✓ Cas de la turbulence inhomogène stationnaire ( $\bar{\mathbf{u}}$  indépendant de  $t$ ):

▷ Filtrage temporel :

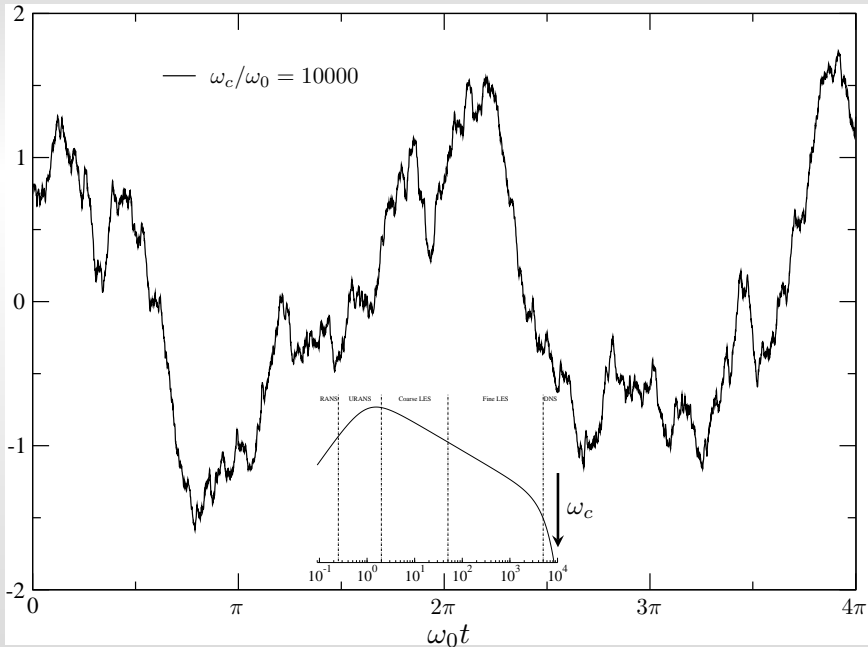
$$\tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t) = \int_{-\infty}^t G_T(t, t') \mathbf{u}(\mathbf{x}, t') dt'$$

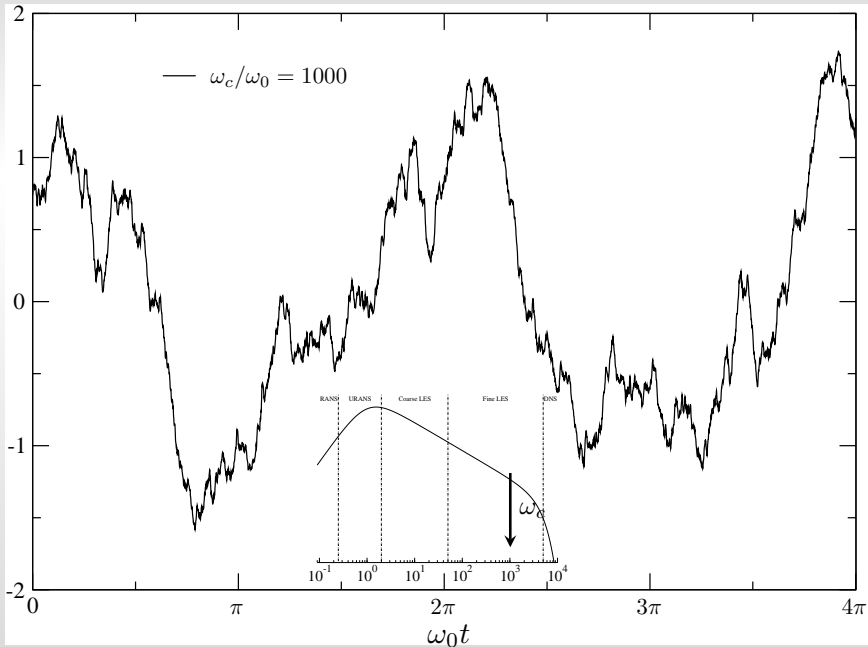
$$\bar{\mathbf{u}}(\mathbf{x}) = \lim_{\Delta_T \rightarrow \infty} \tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t)$$

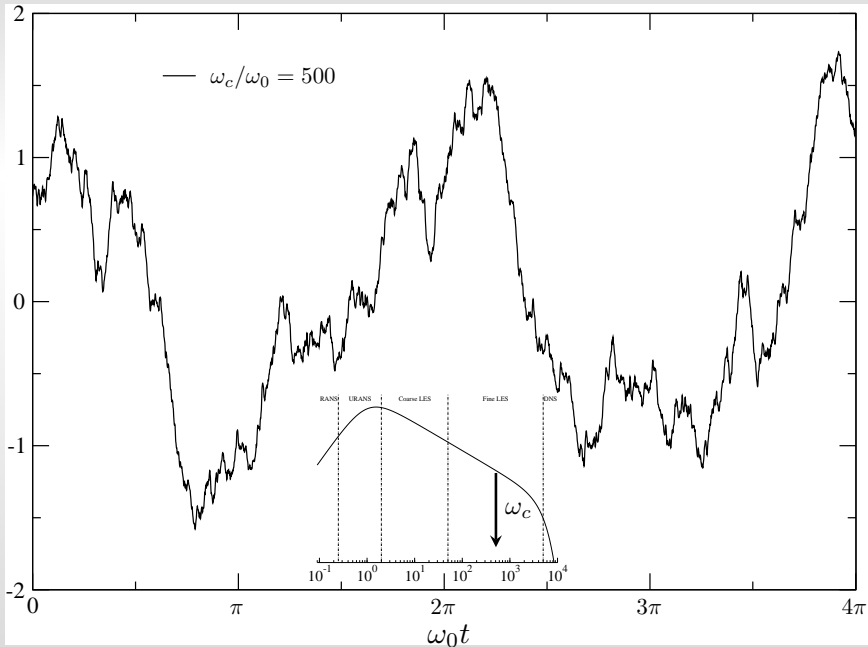


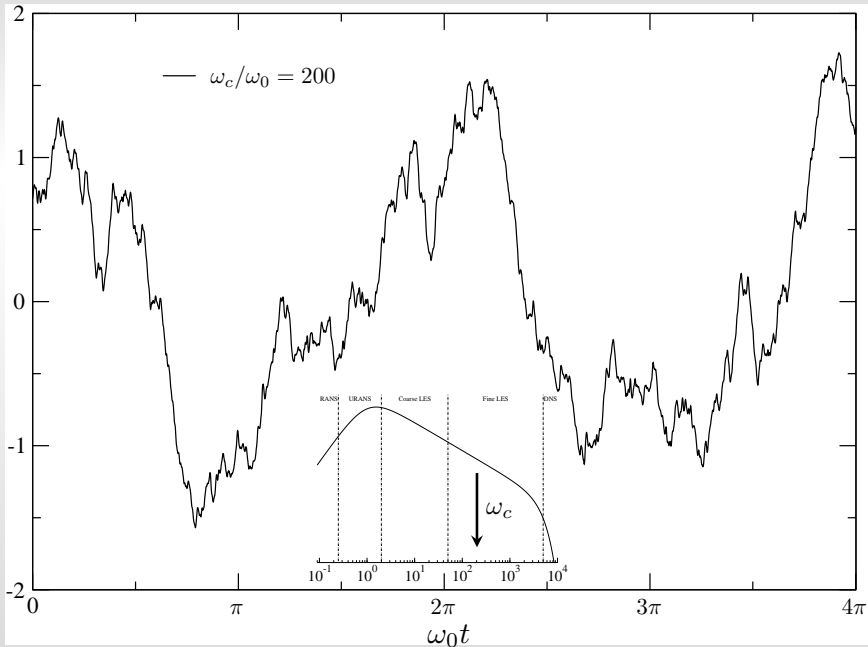
✓  $\omega_c \rightarrow 0$ : Les tensions de sous-filtre tendent vers les tensions de Reynolds (Pruett et al., 2003)  $\Rightarrow$  les équations RANS sont retrouvées

✓  $\omega_c \rightarrow \infty$ : Les tensions de sous-filtre tendent vers zéro  $\Rightarrow$  les équations de Navier-Stokes sont retrouvées

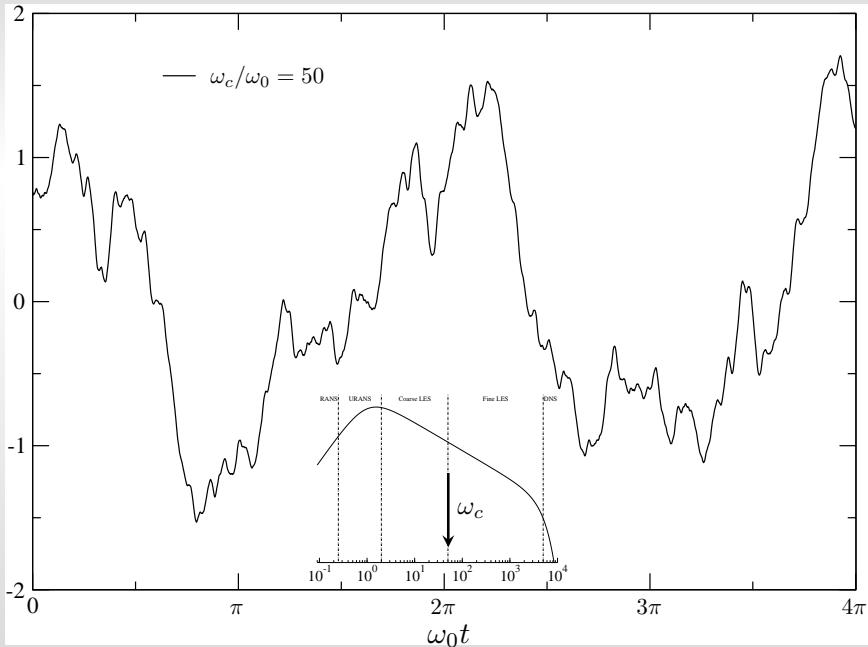


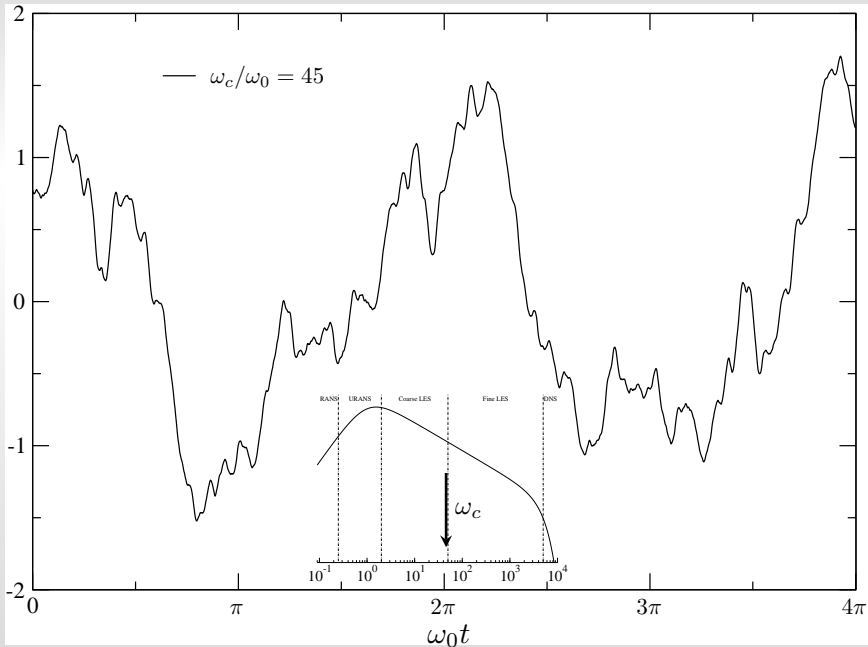


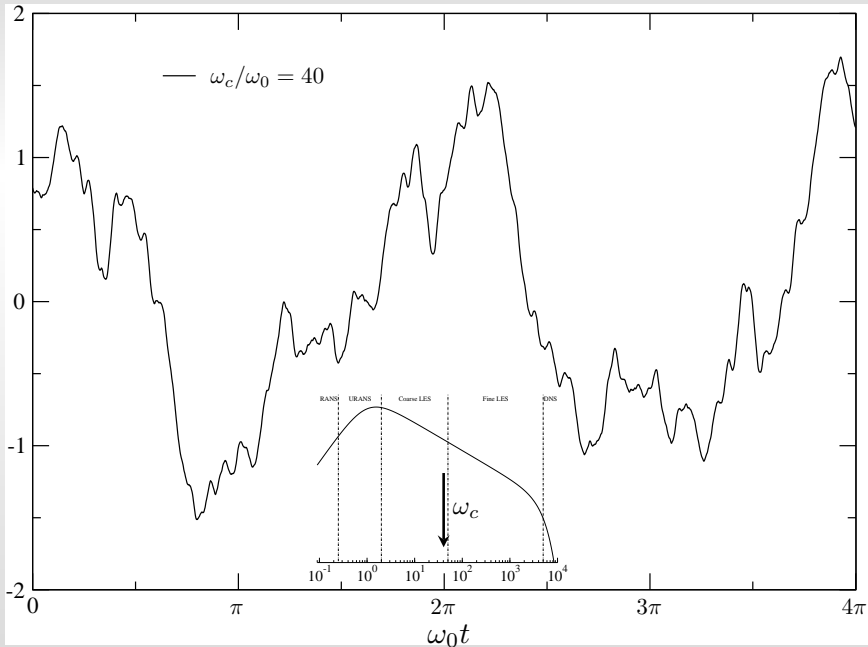


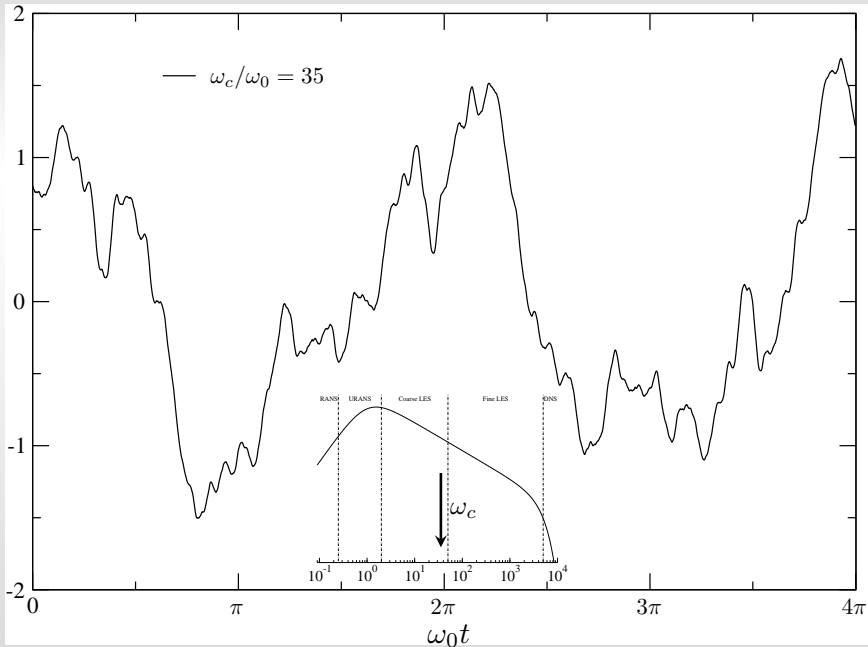


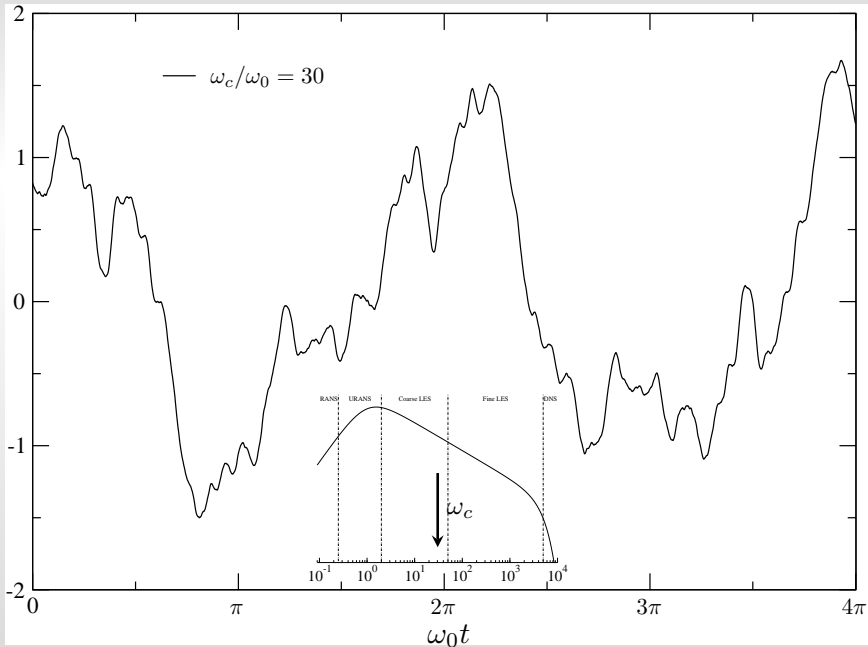


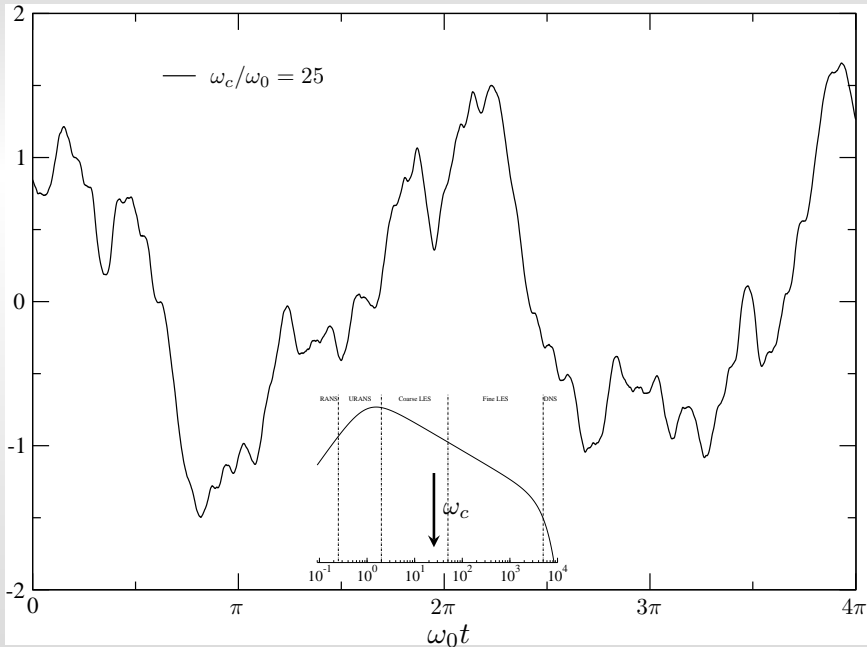


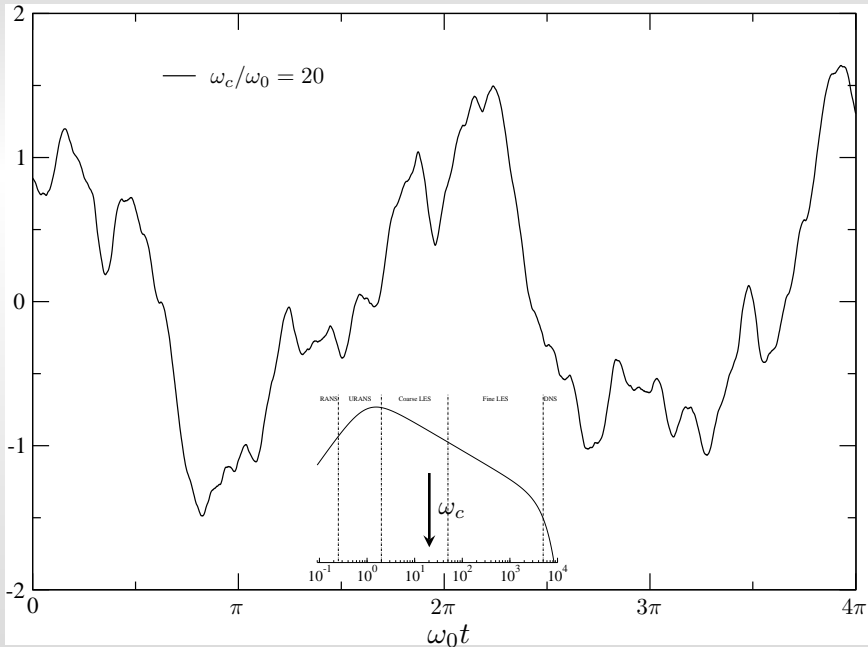


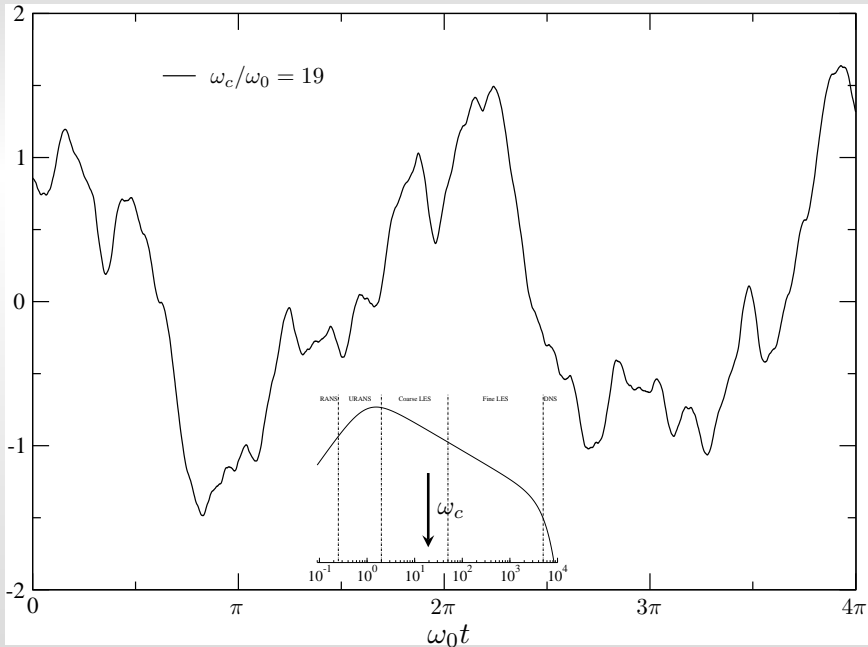


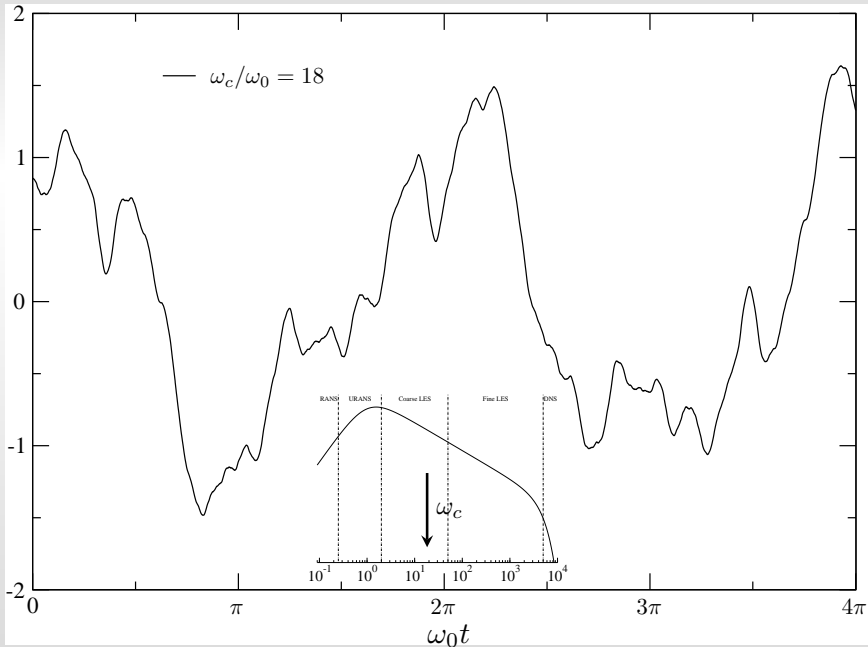


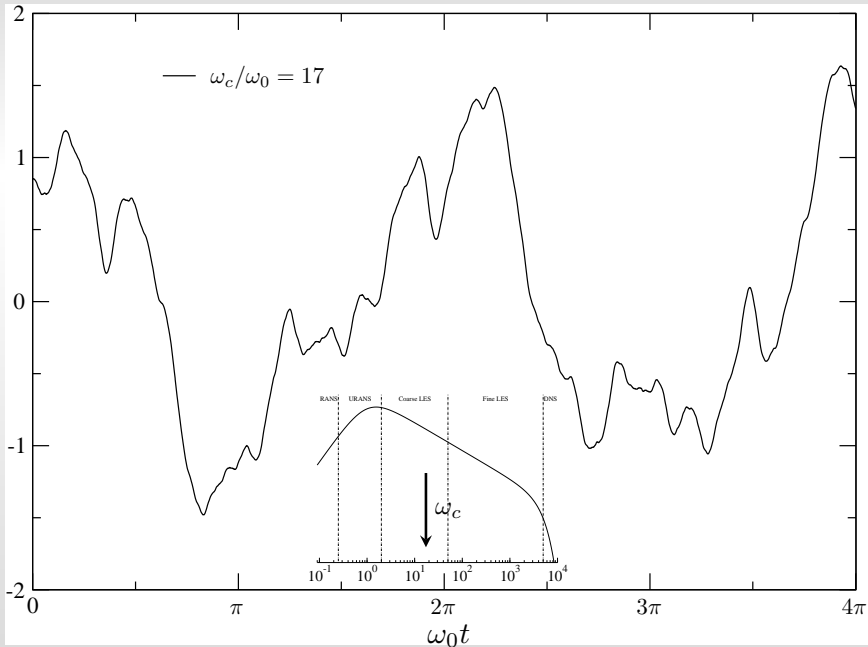


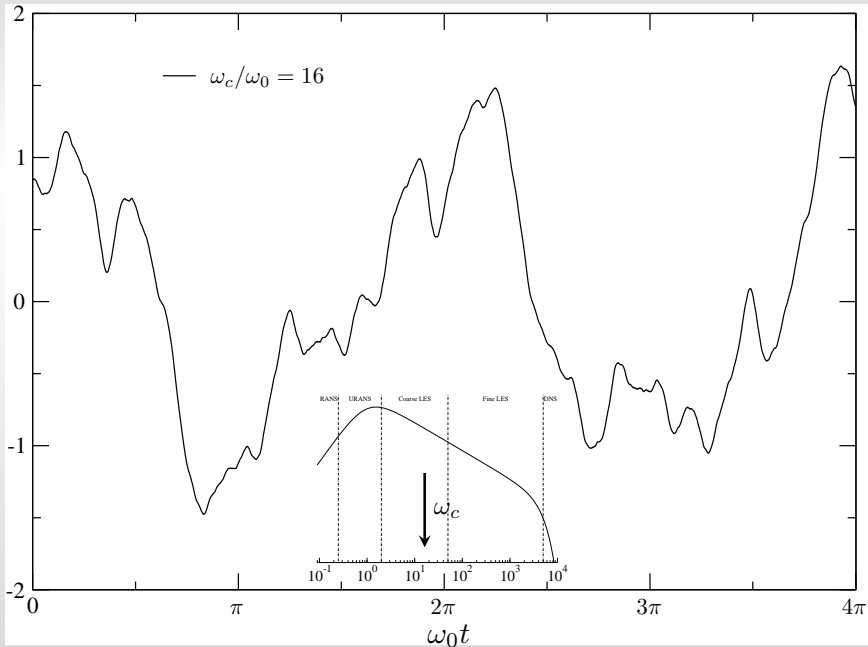


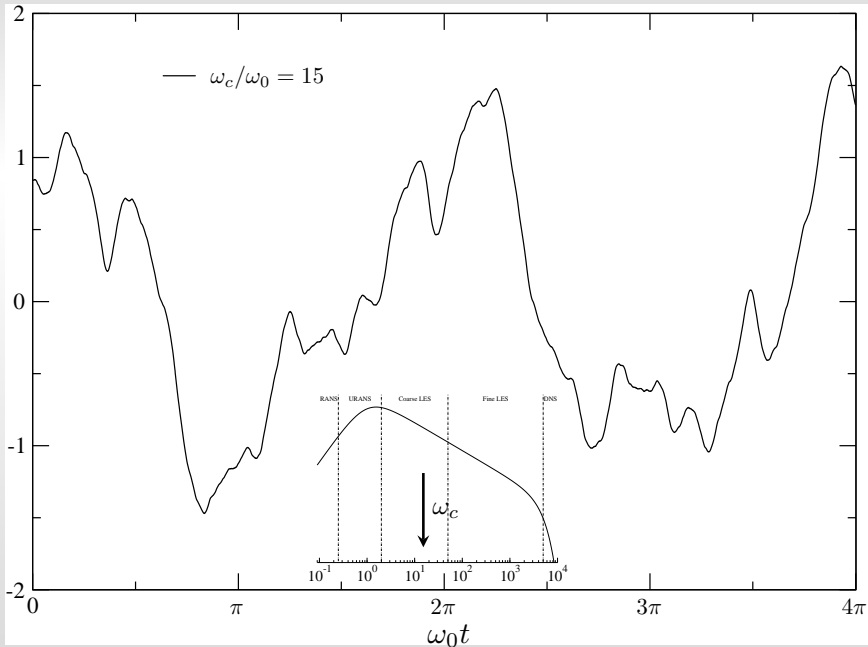


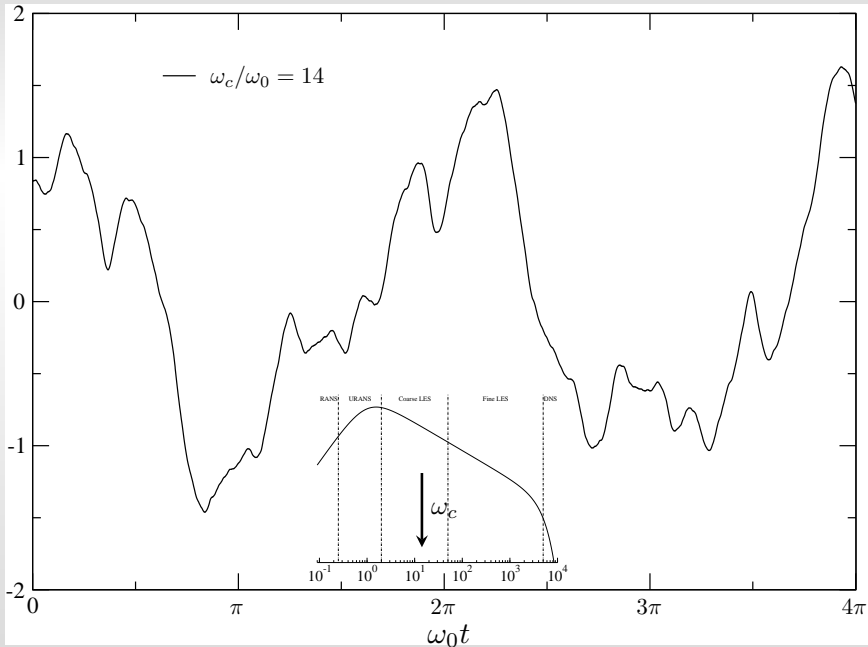


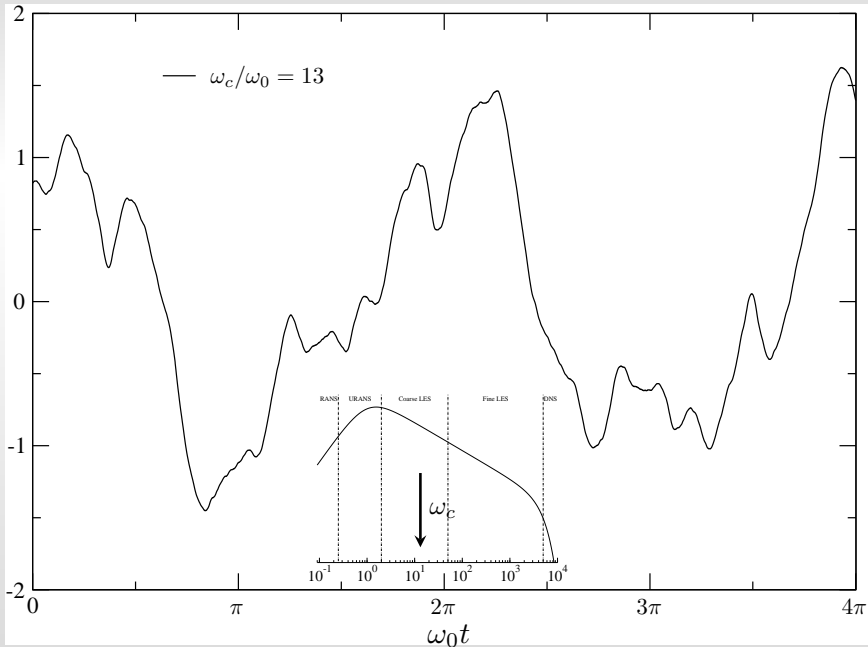


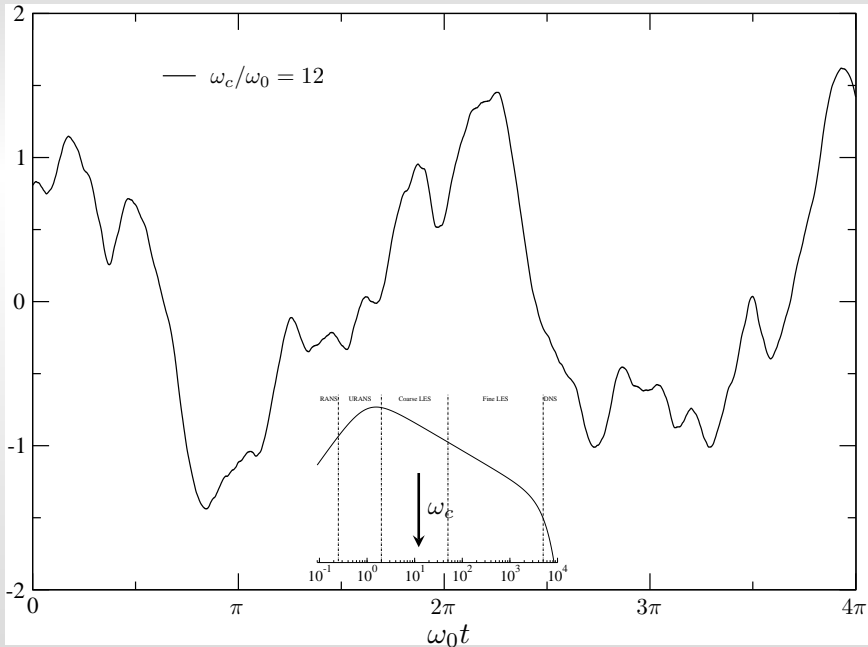


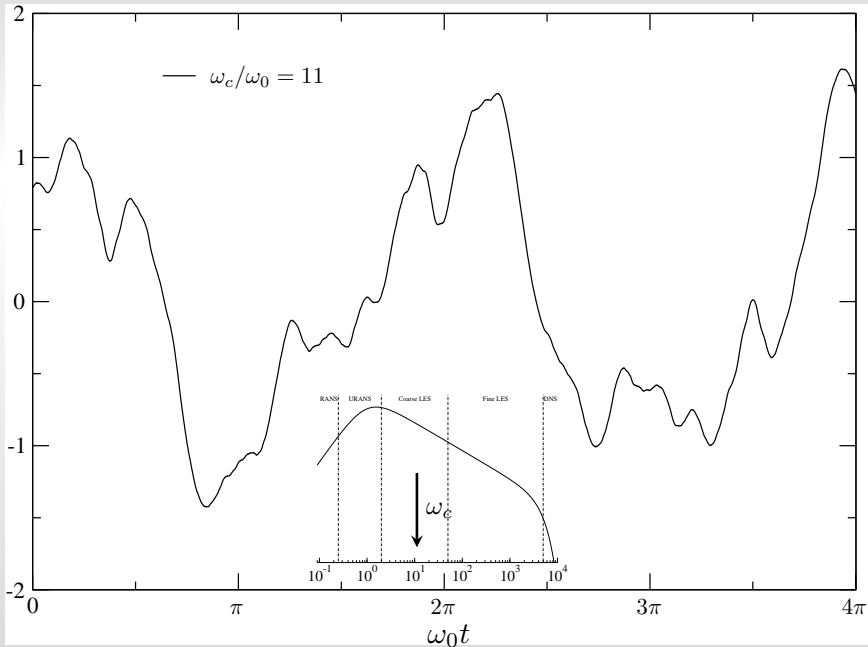


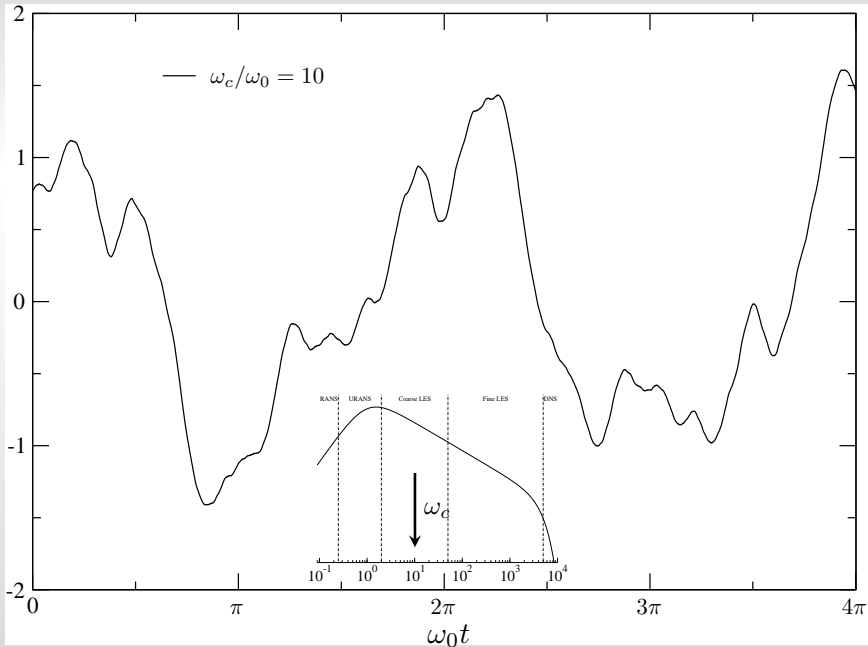


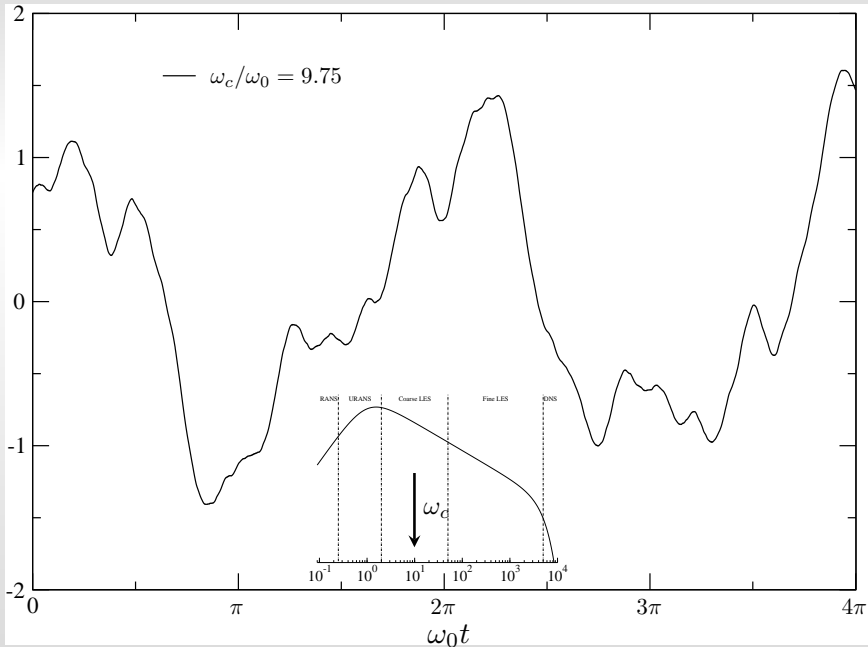


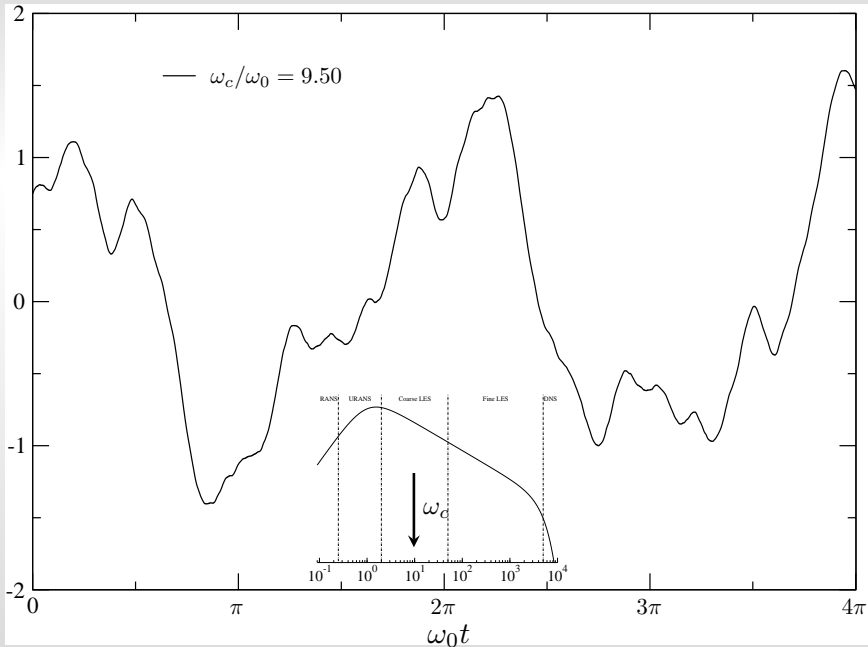


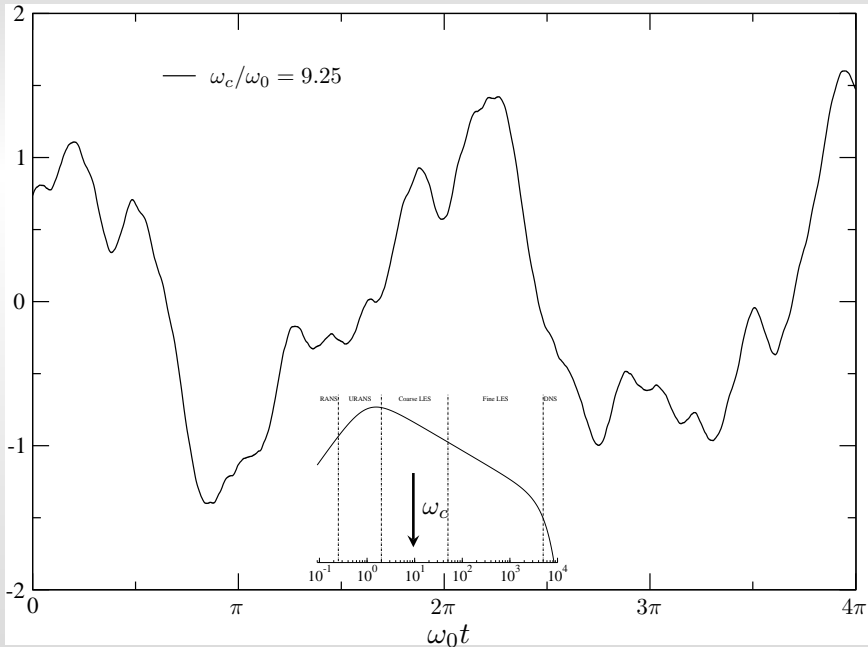


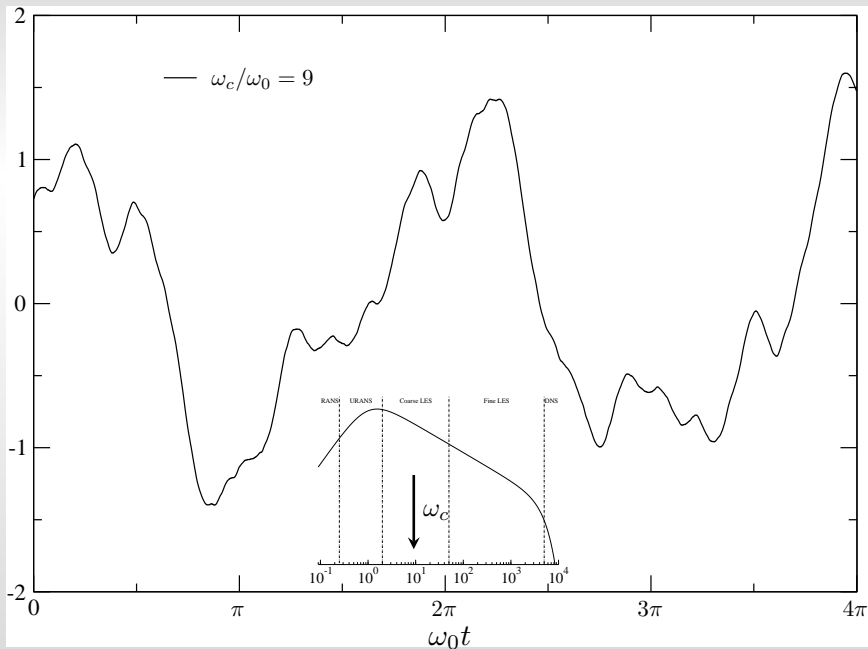


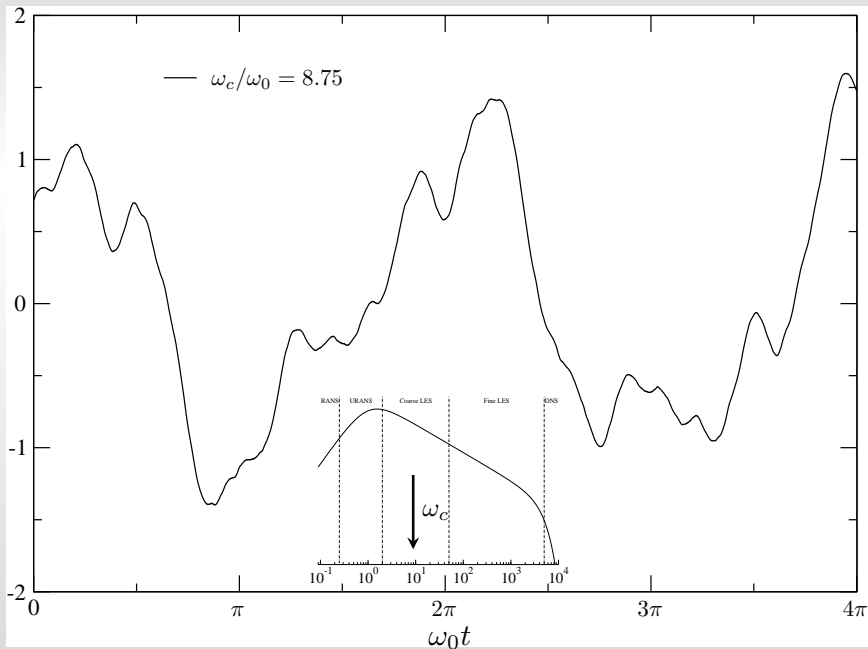


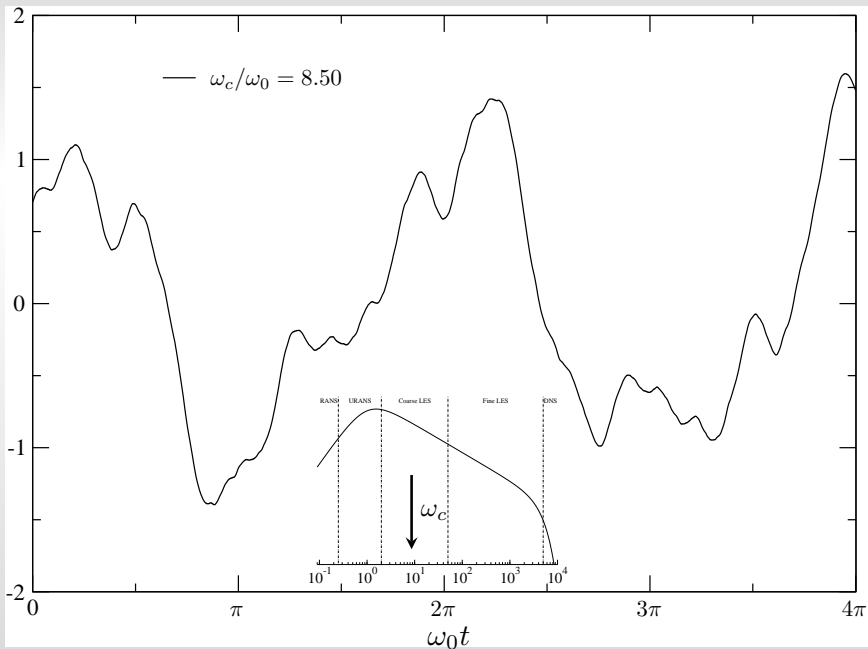


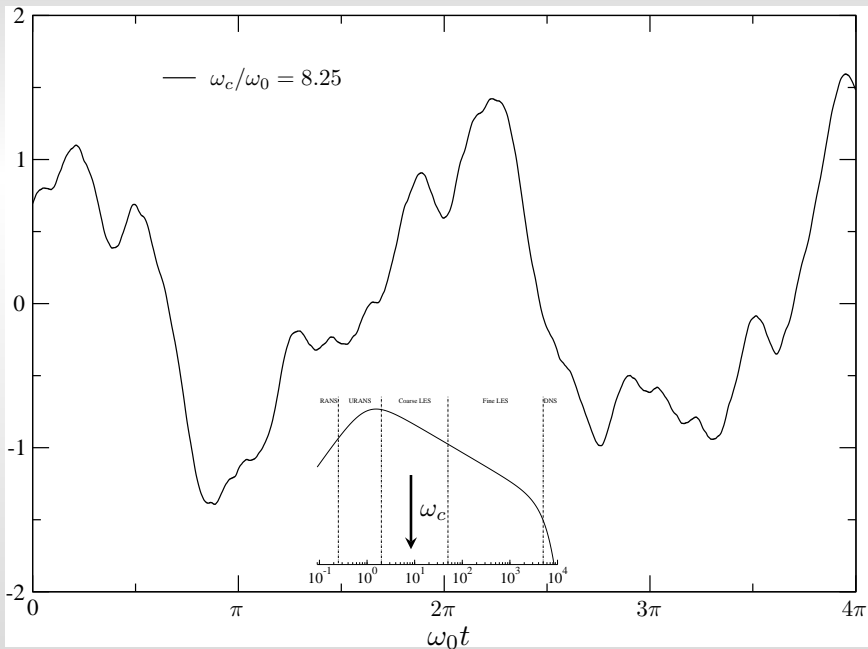


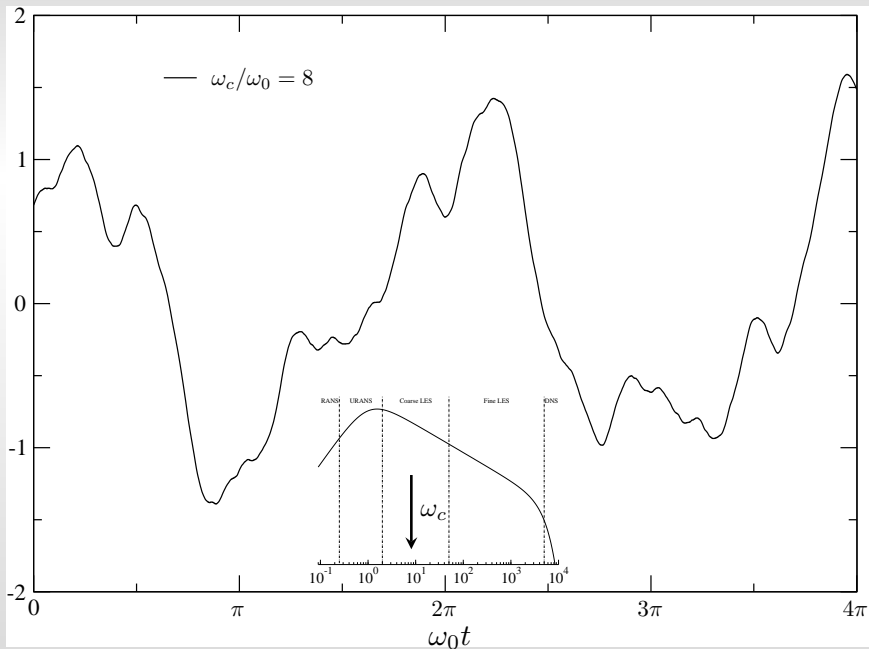


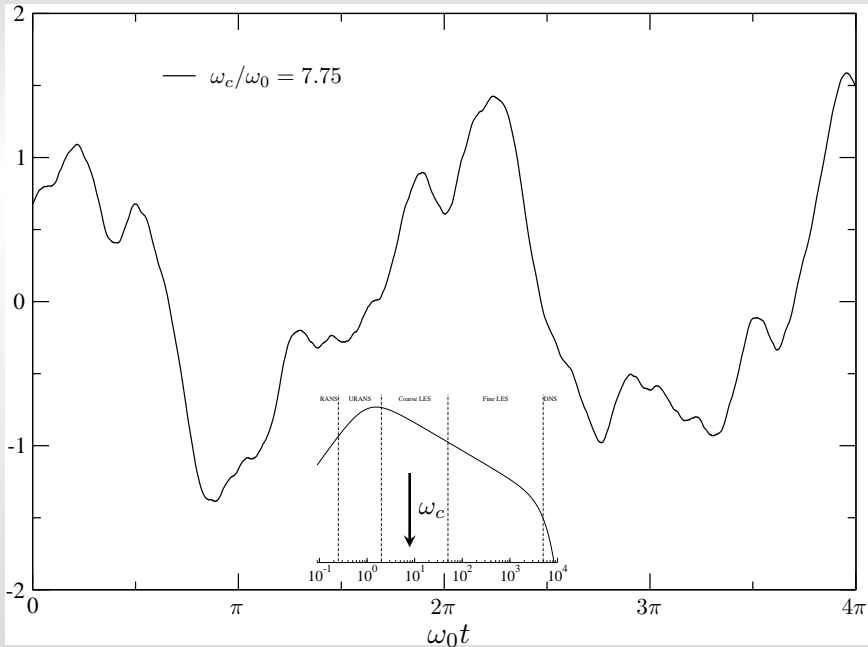


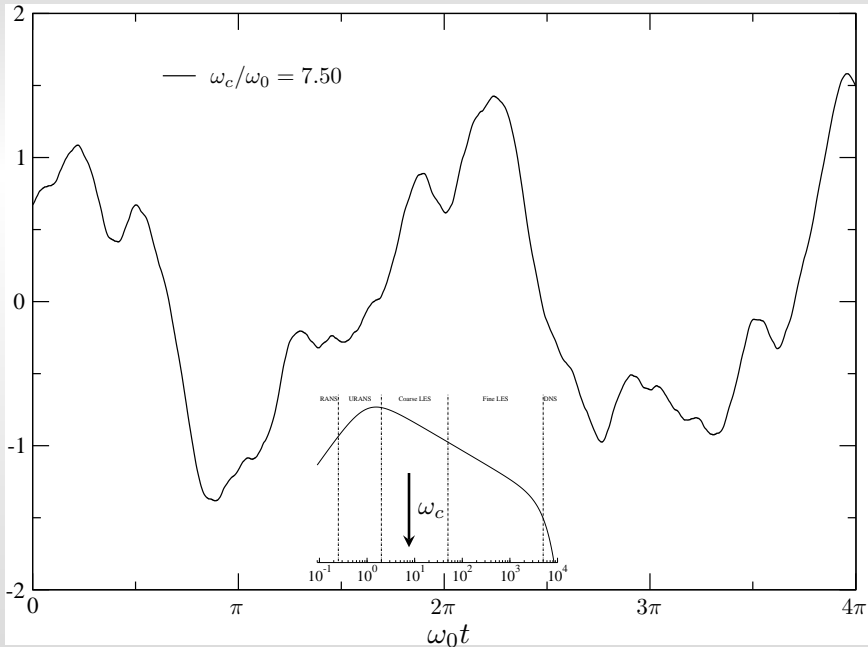


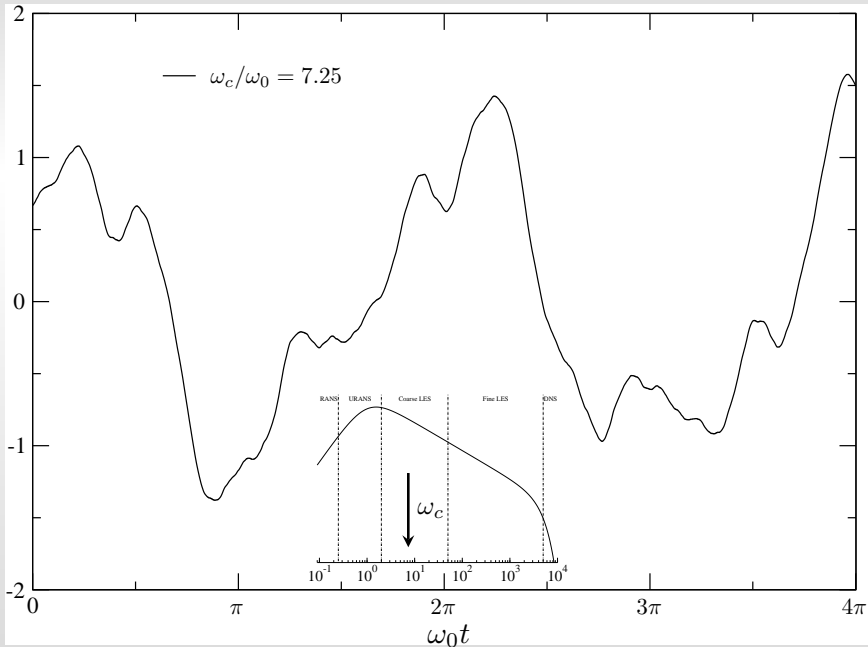


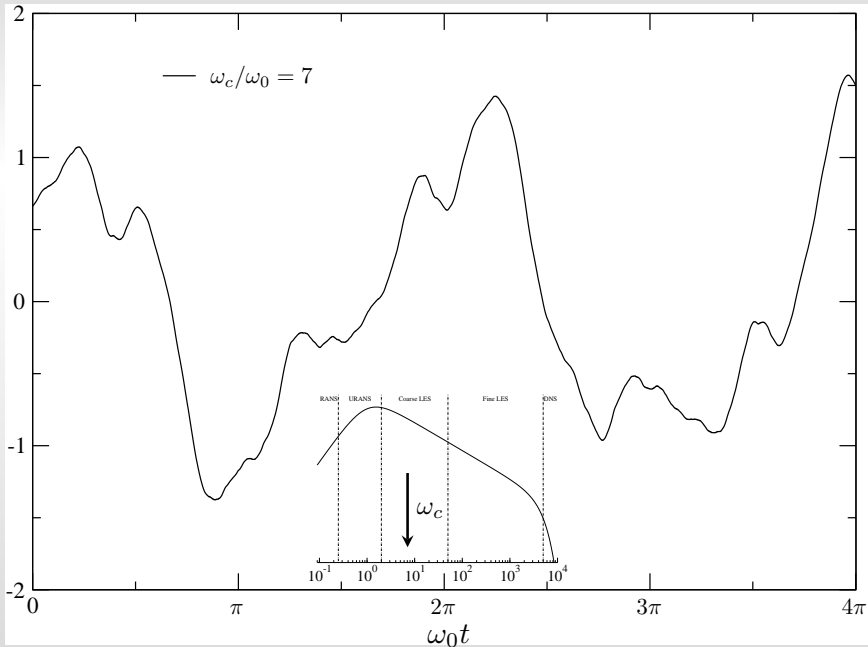


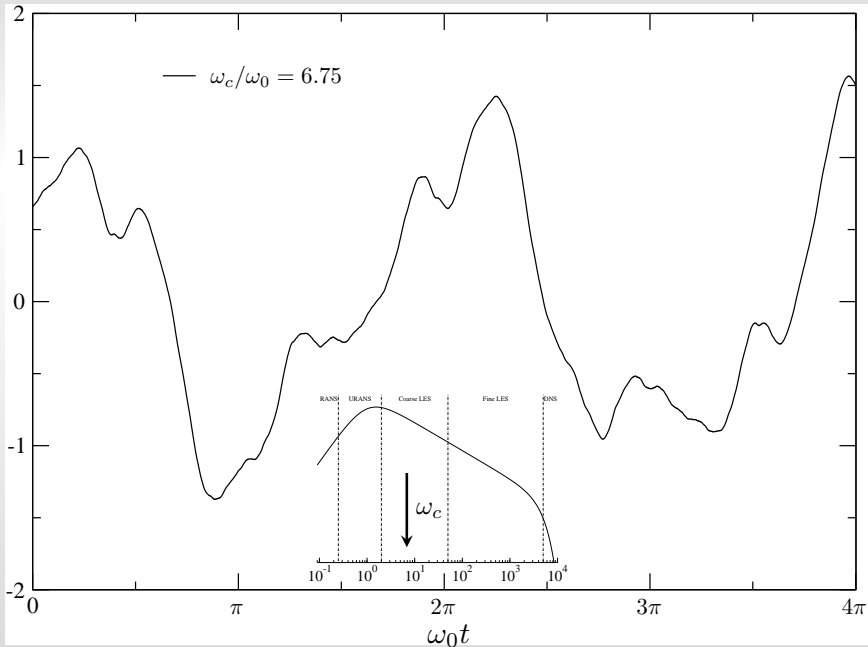


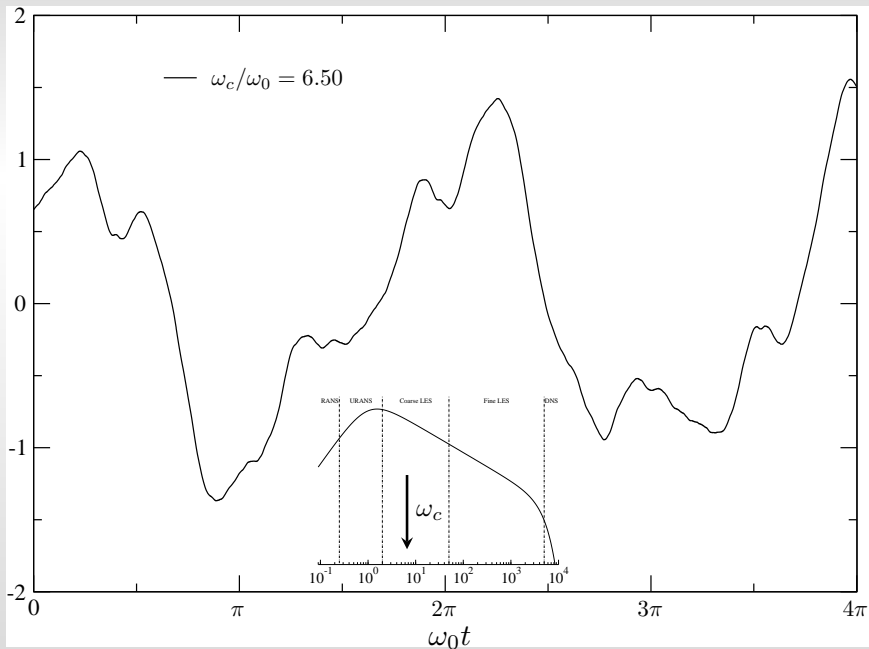


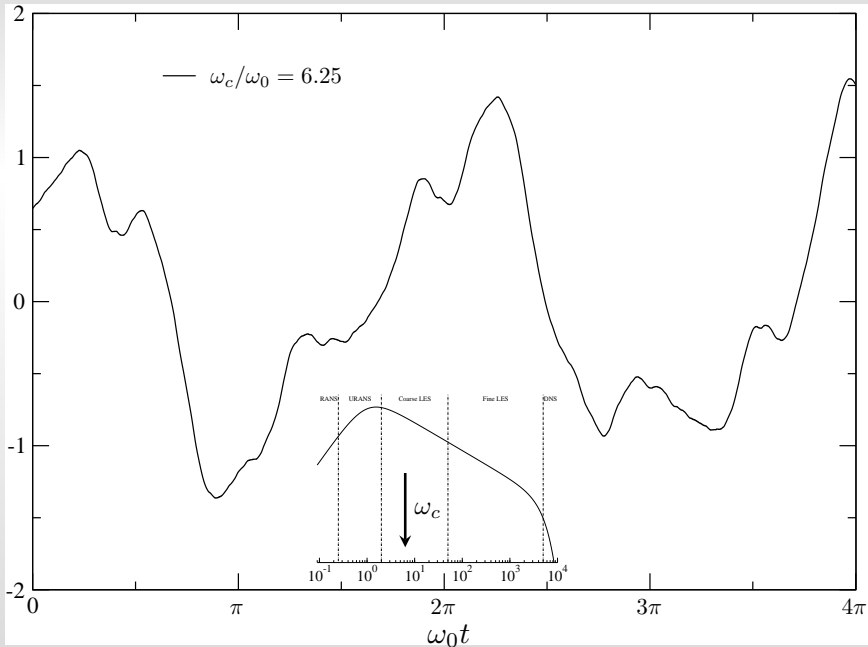


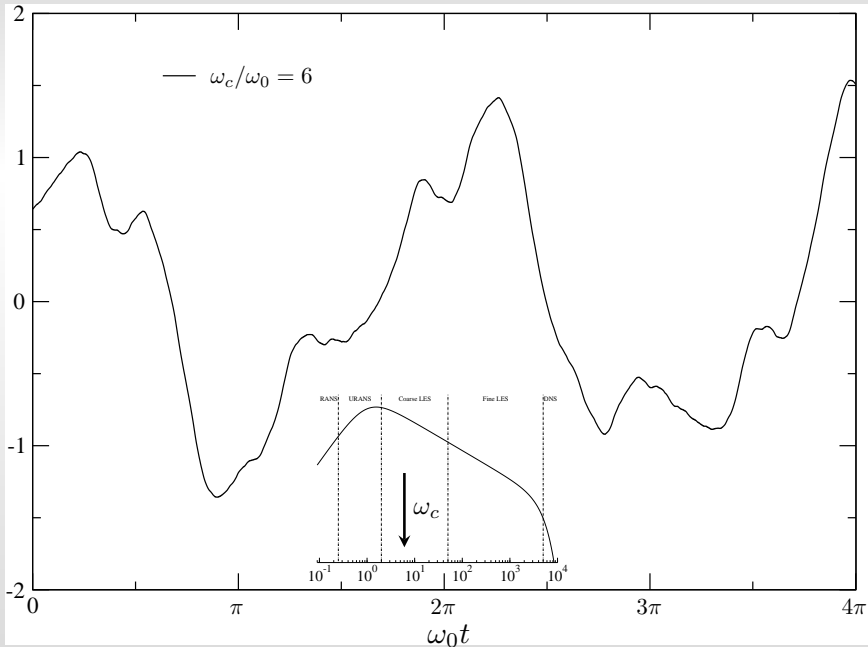


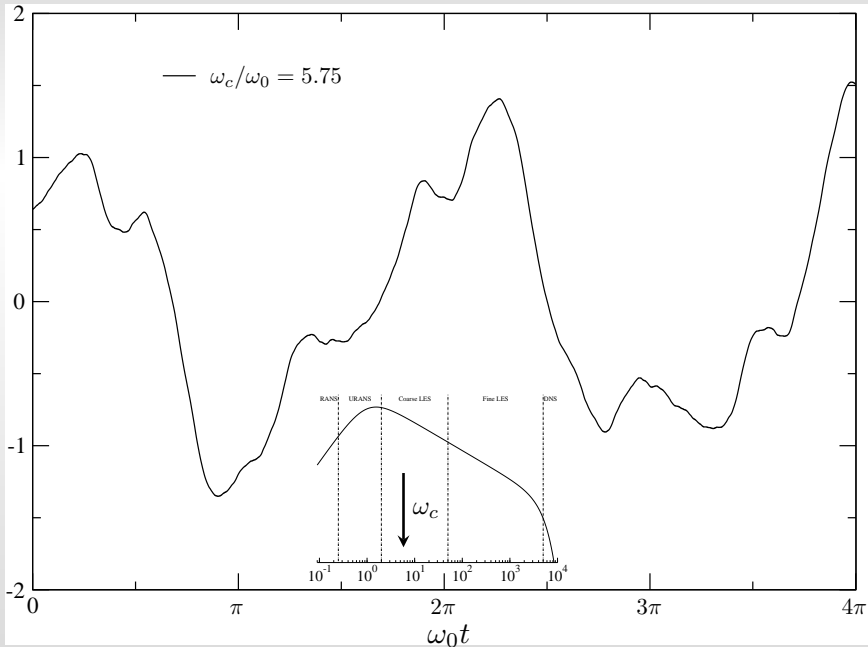


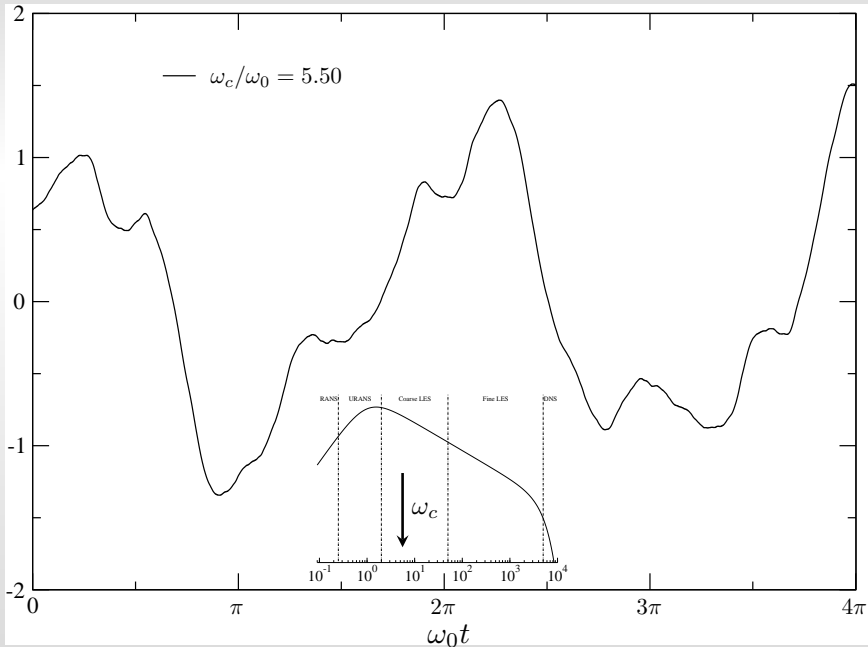


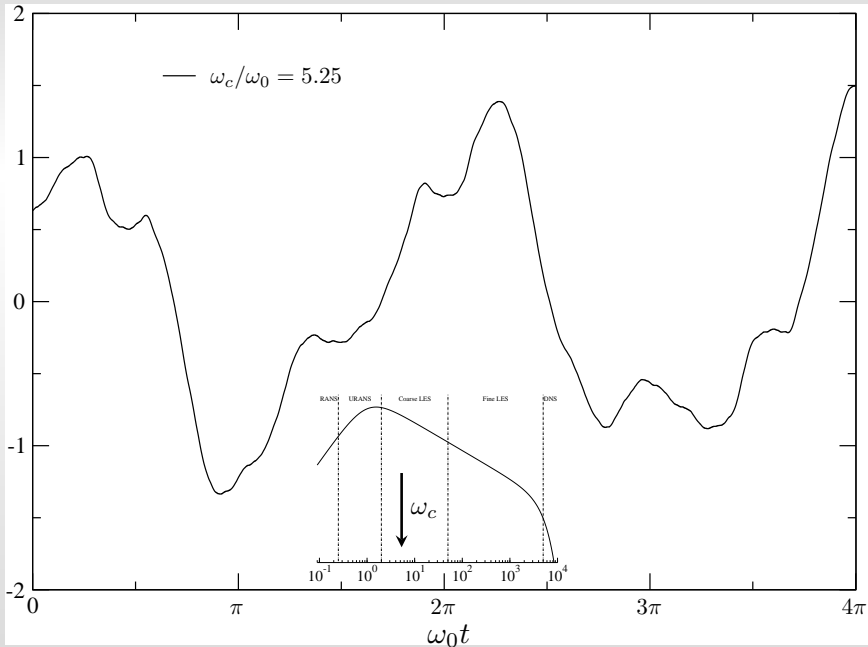


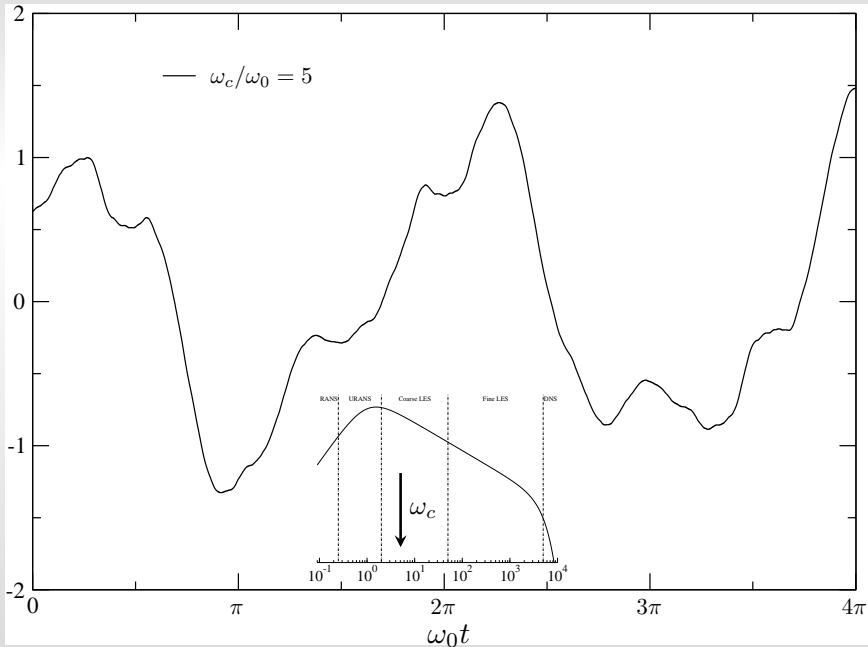


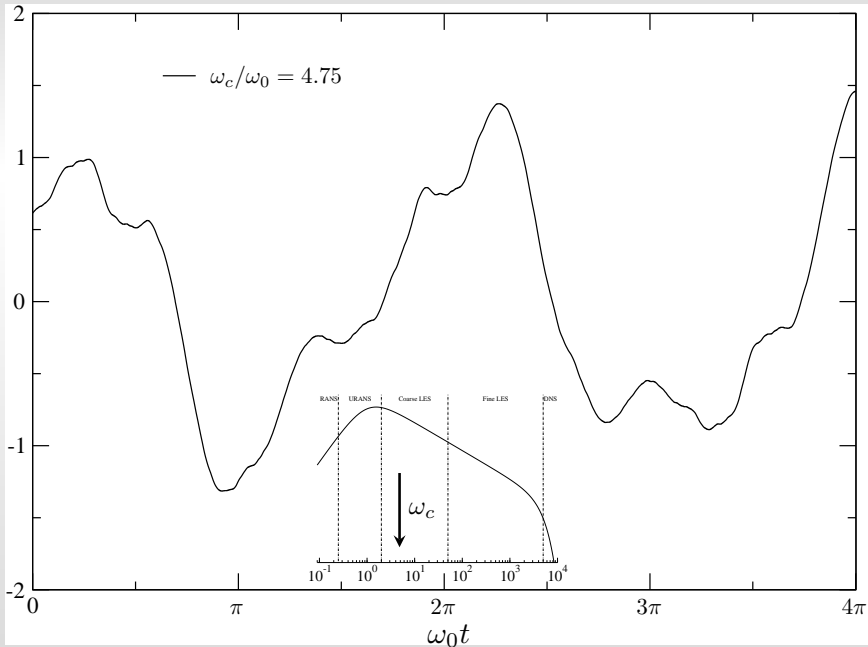


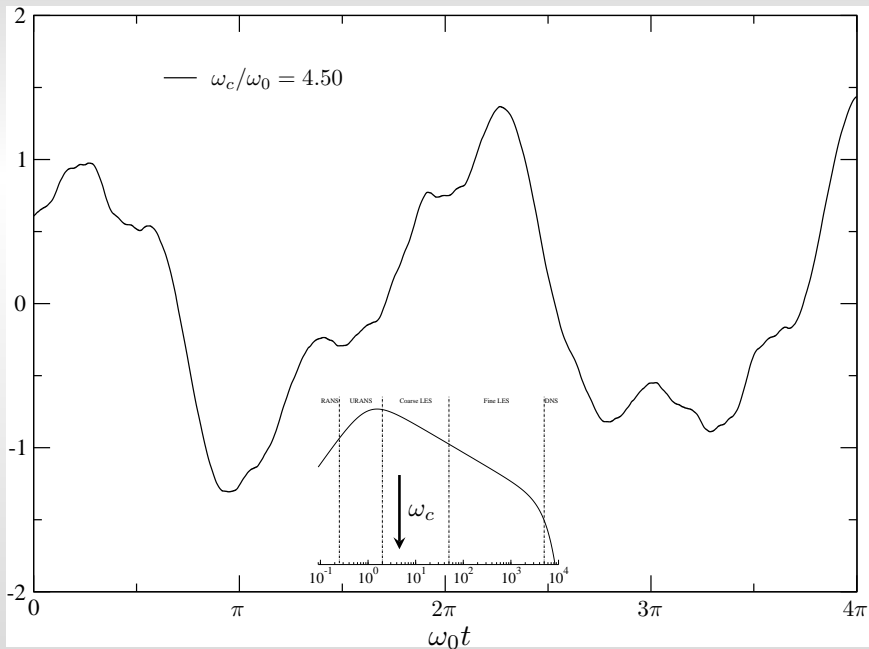


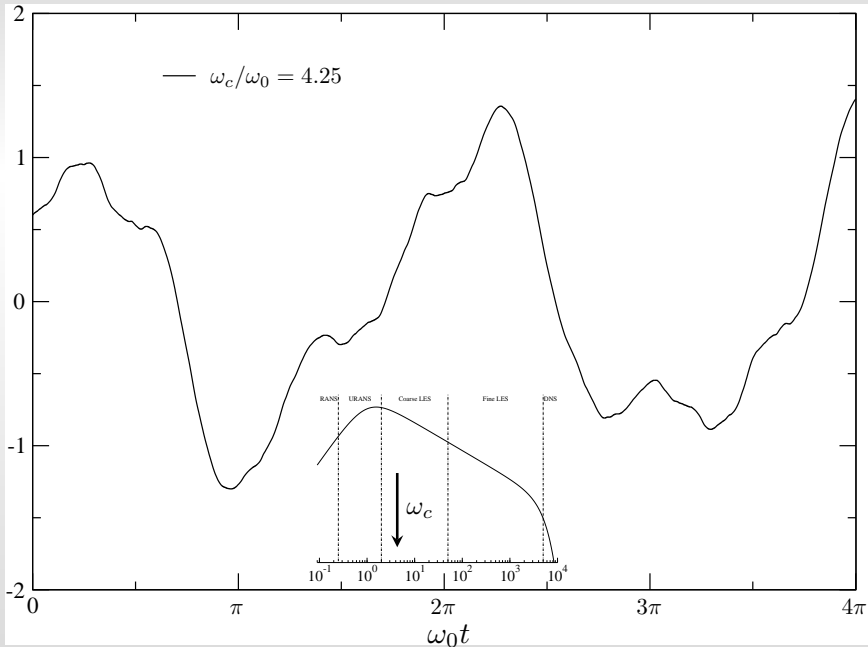


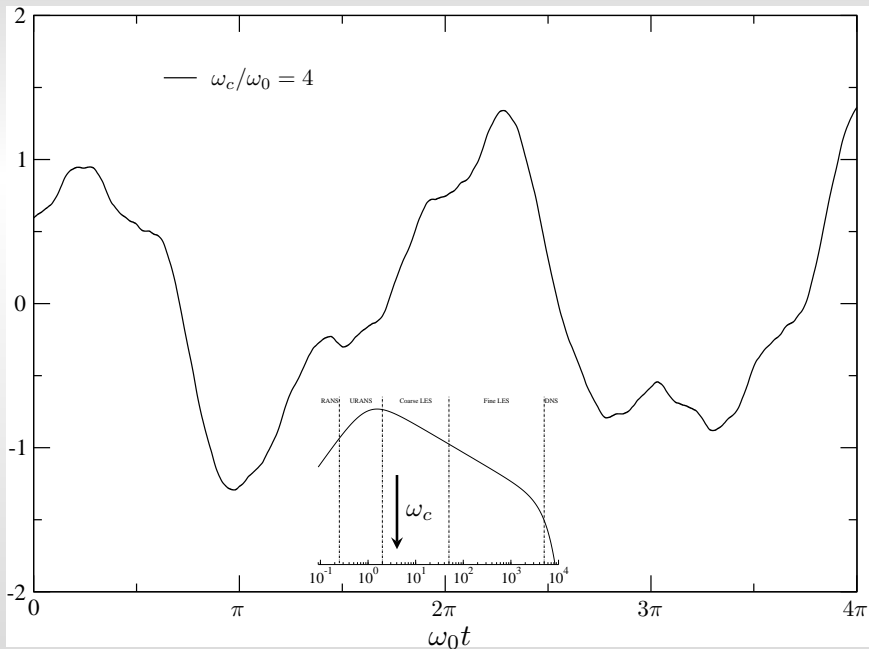


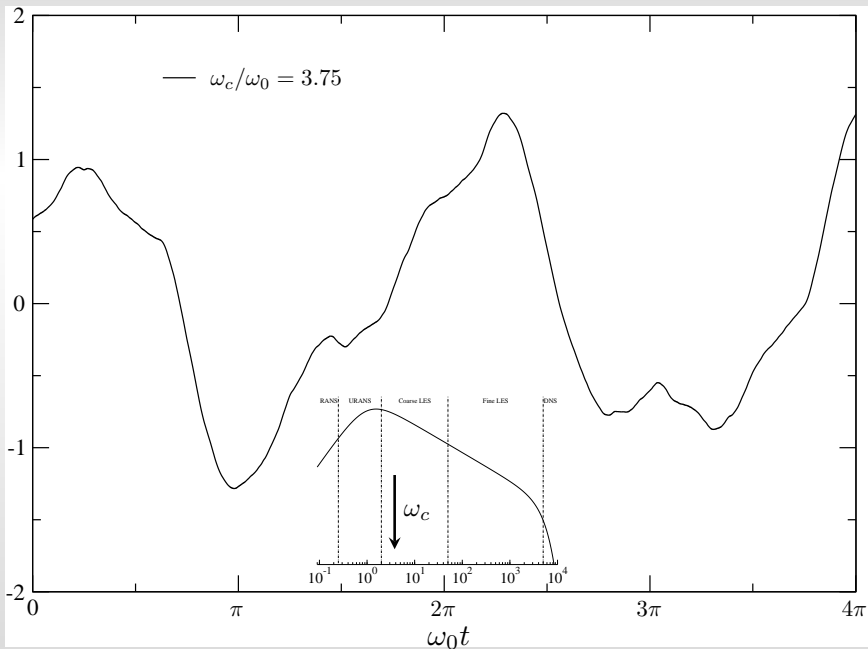


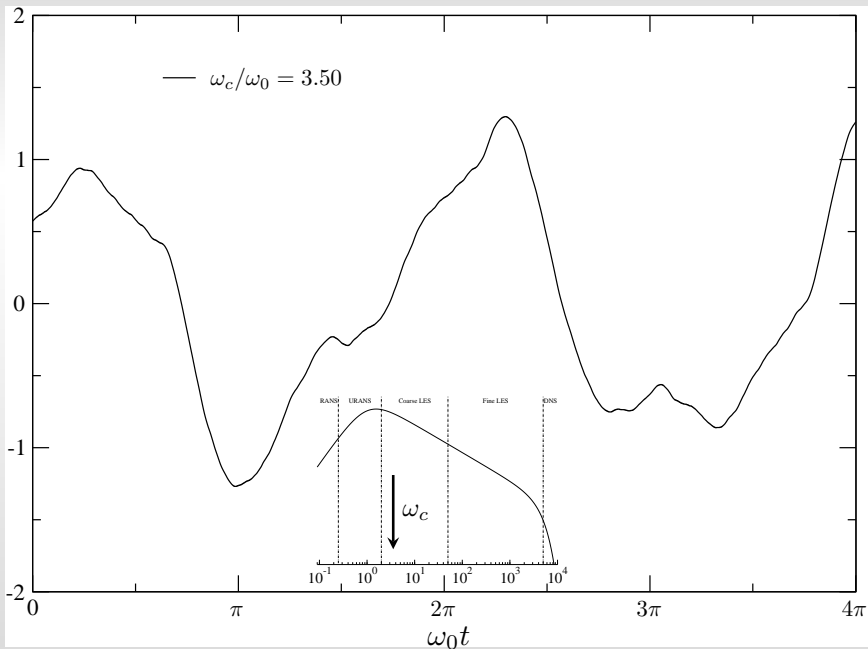


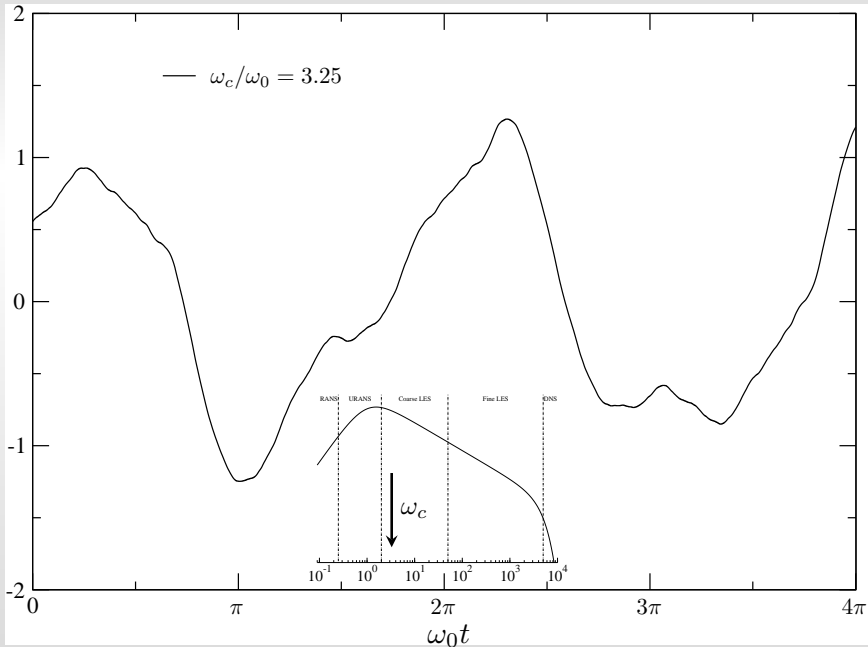


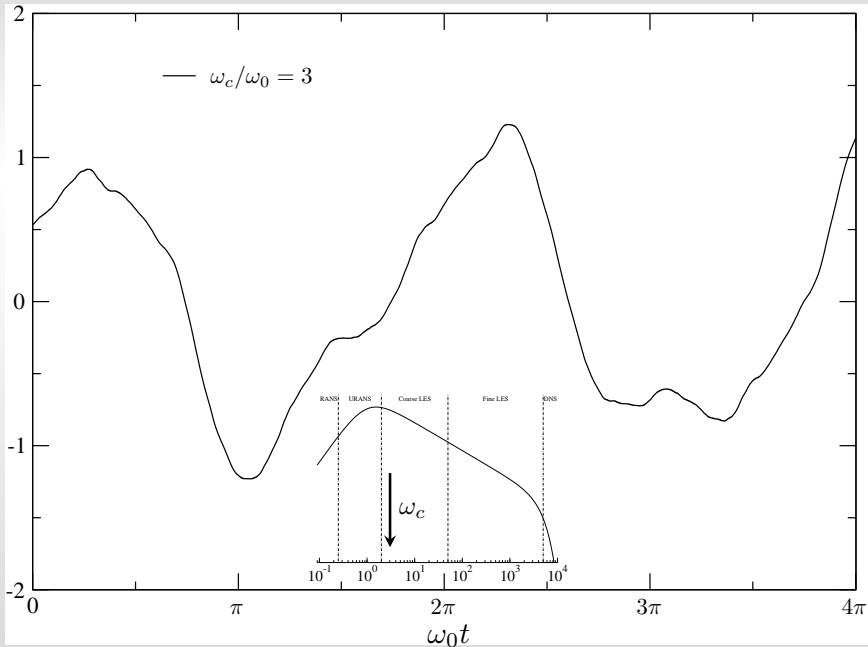


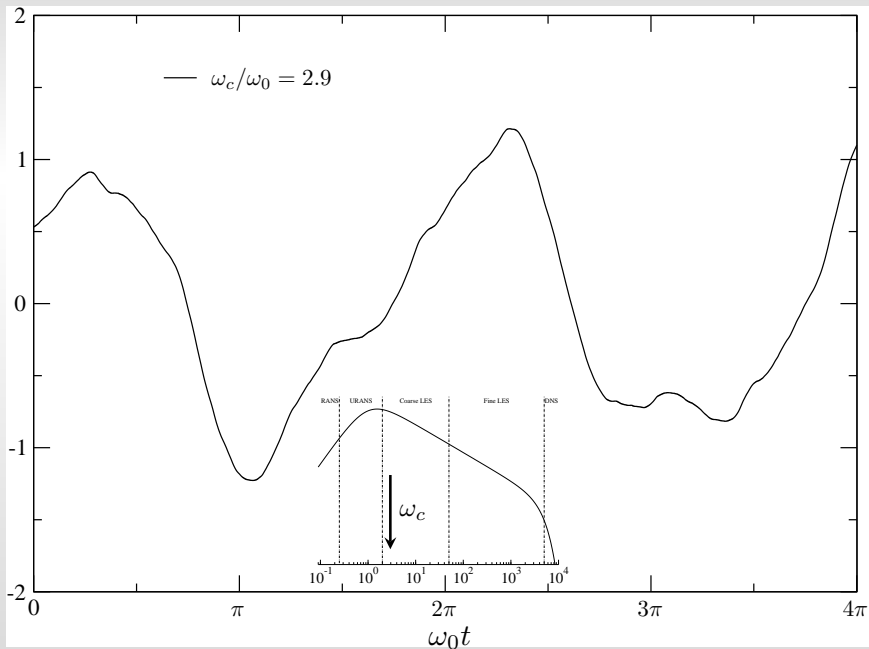


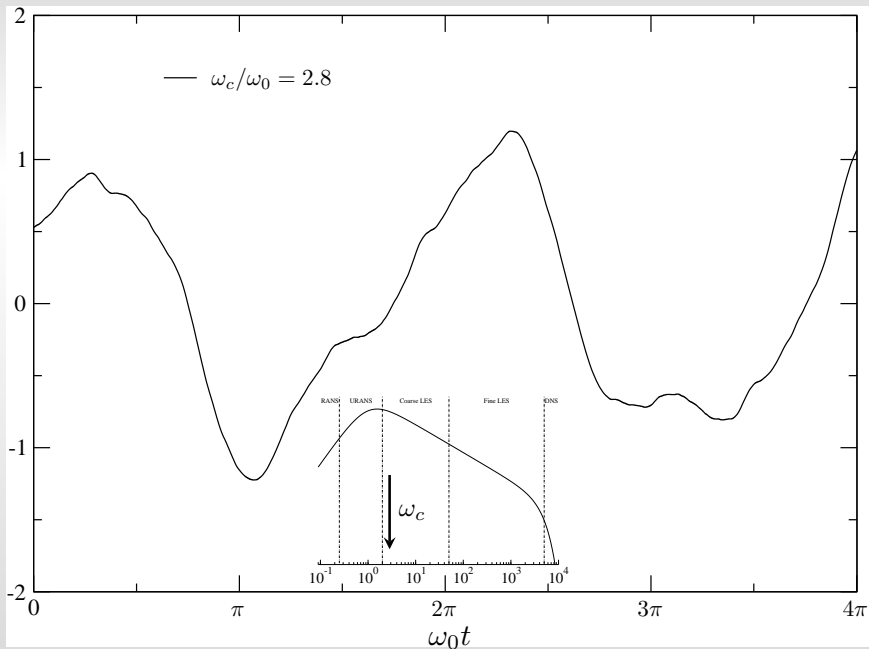


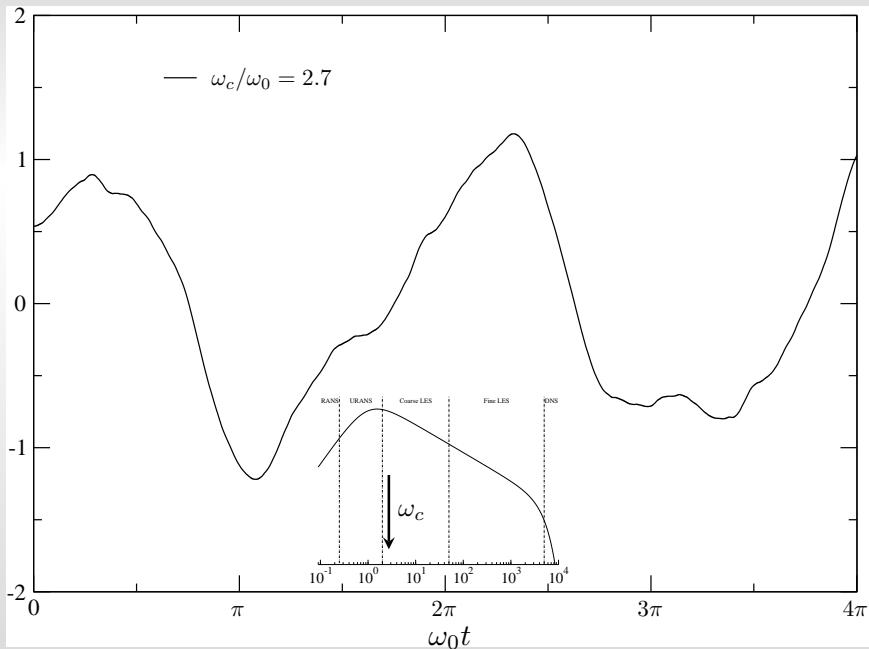


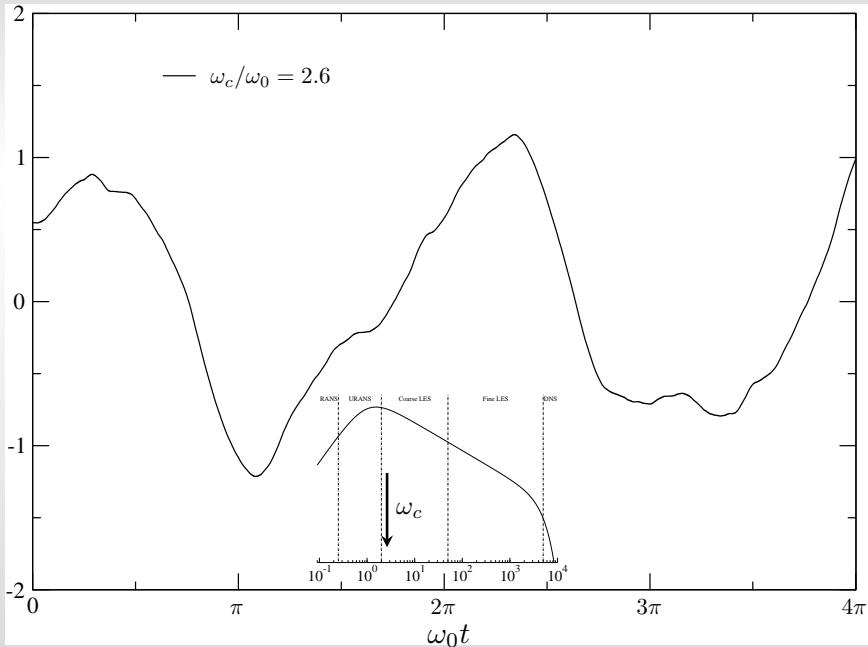


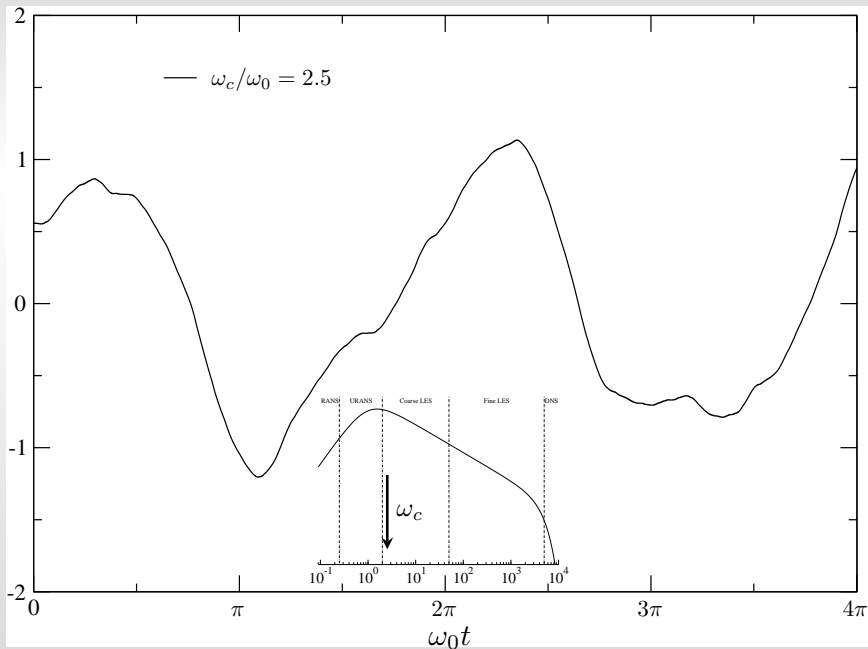


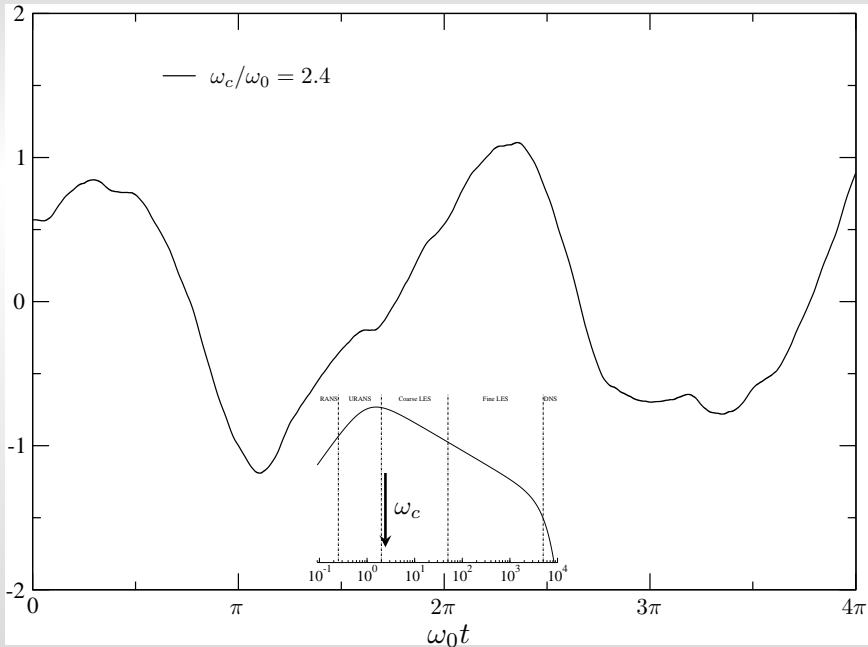


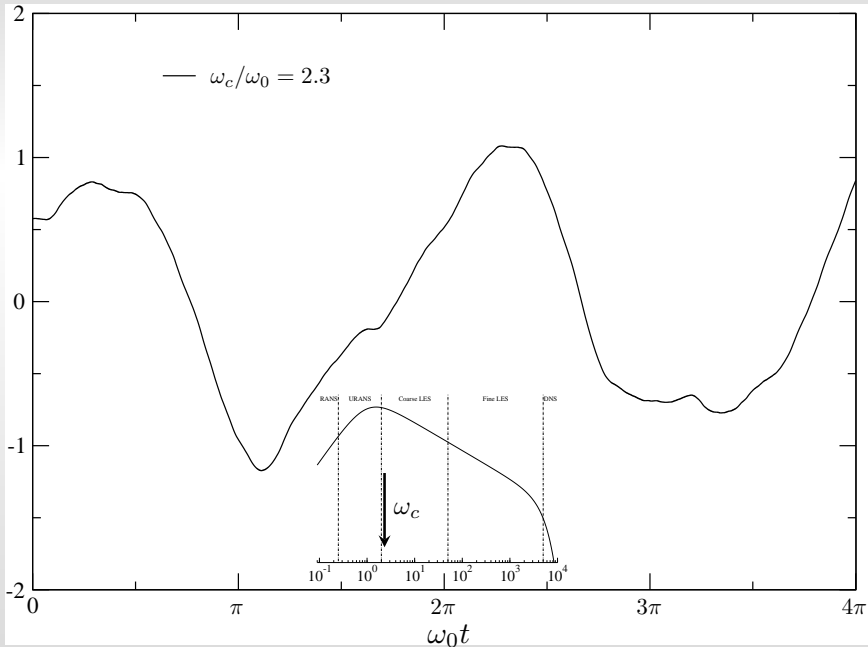


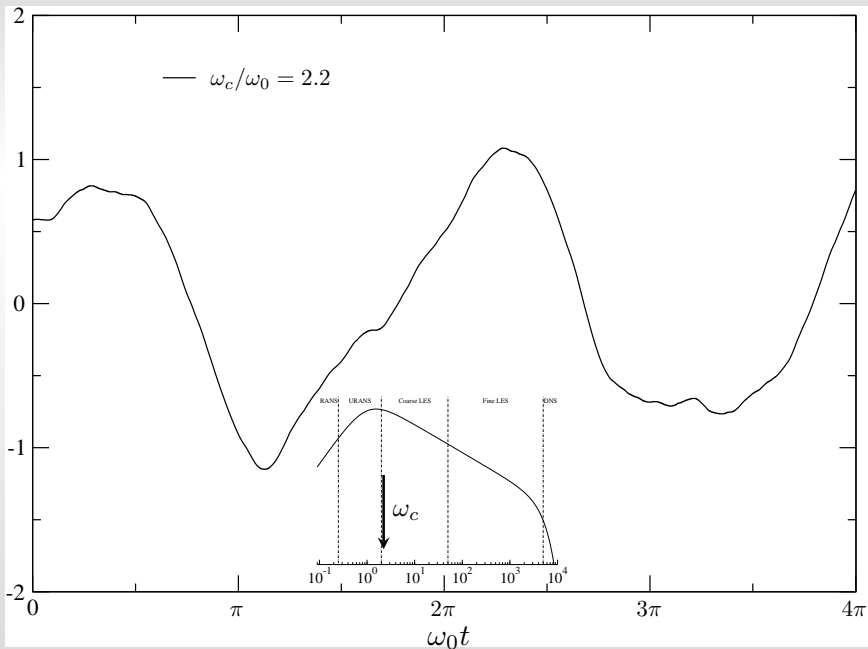


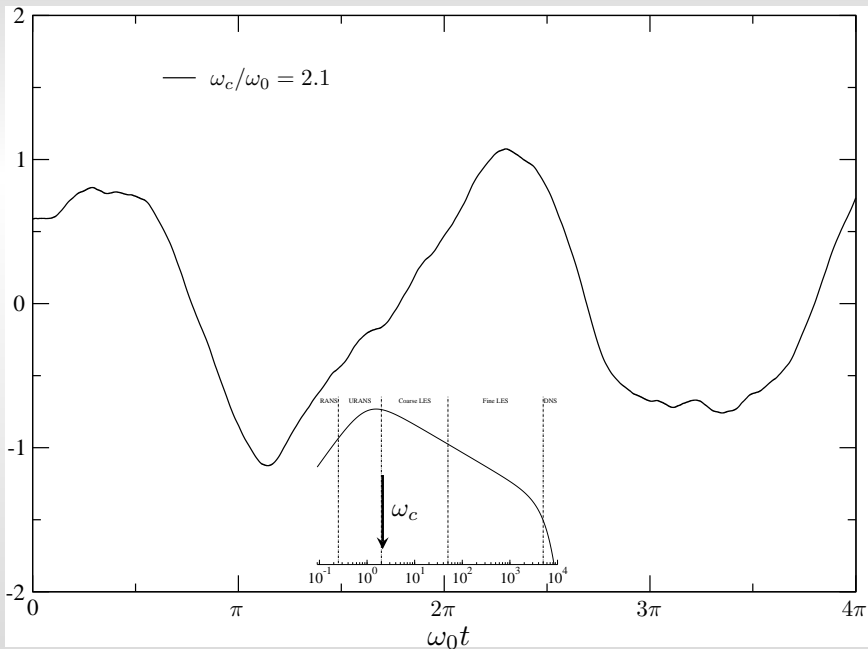


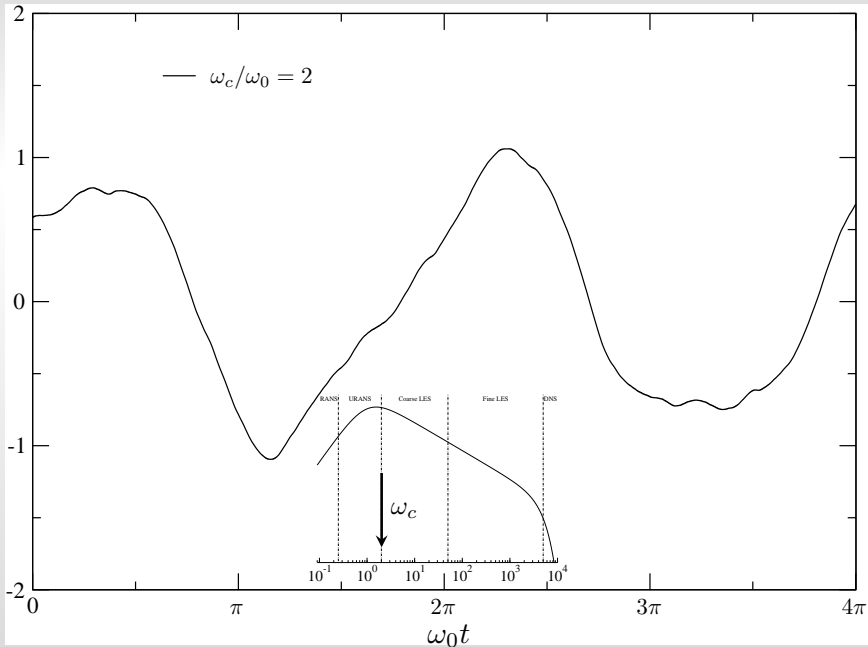


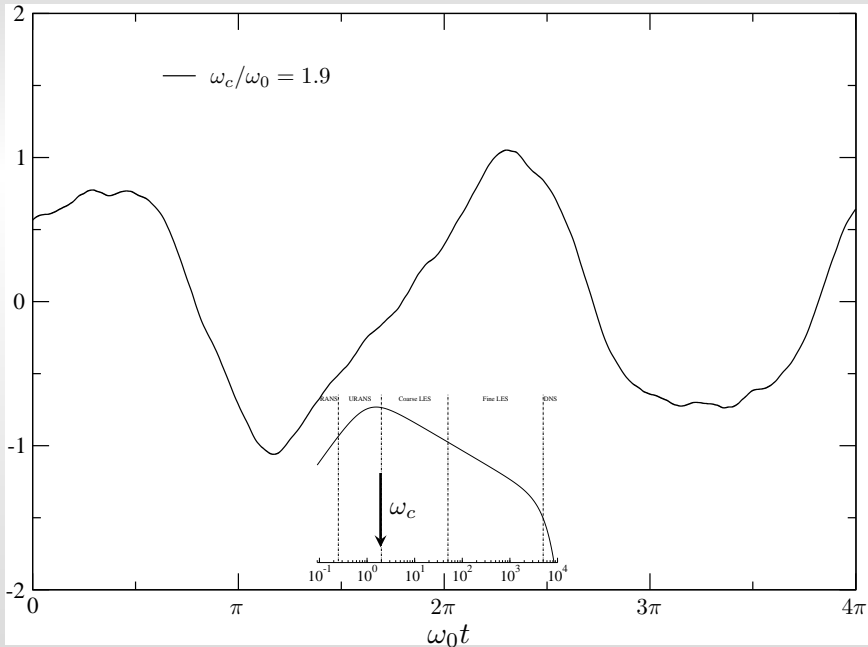


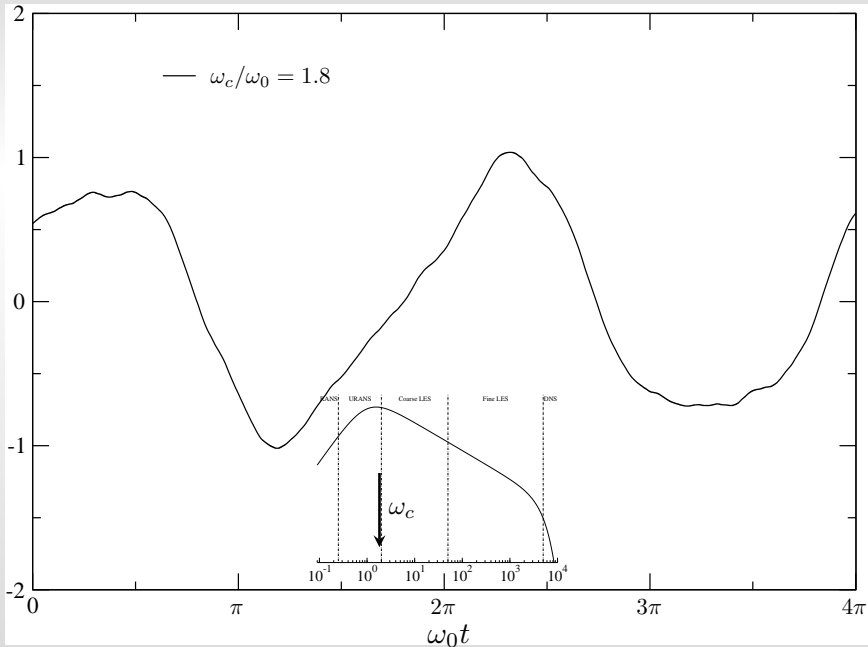


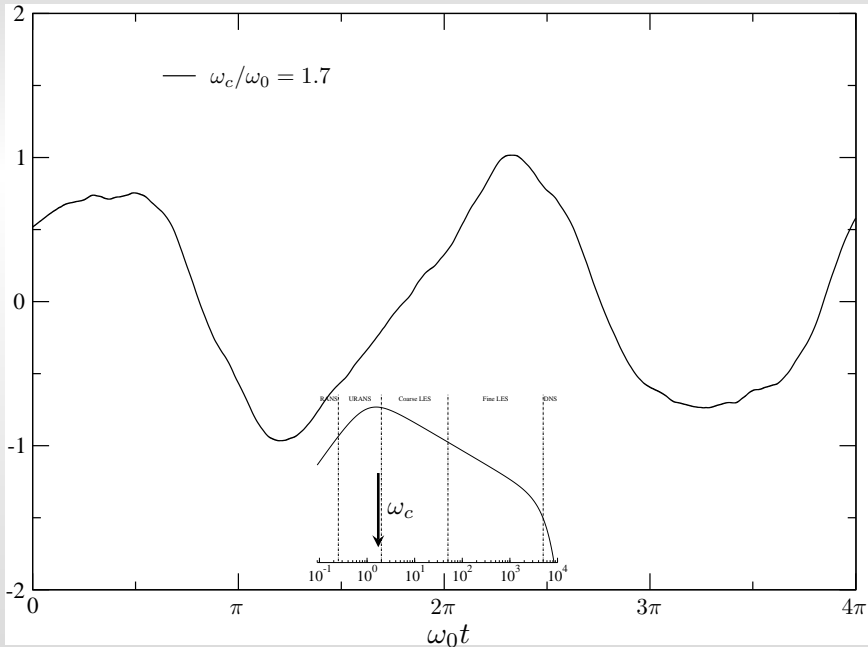


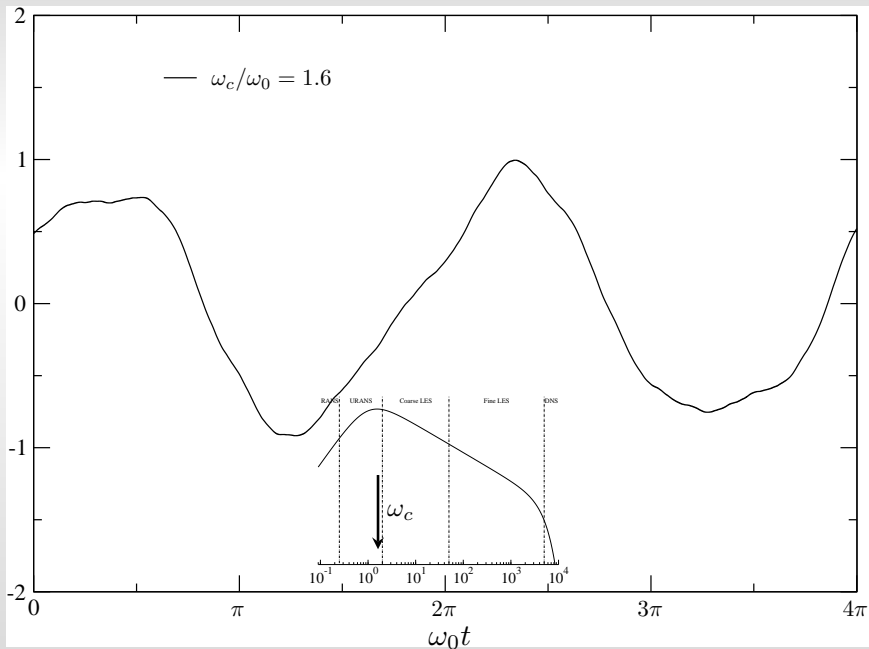


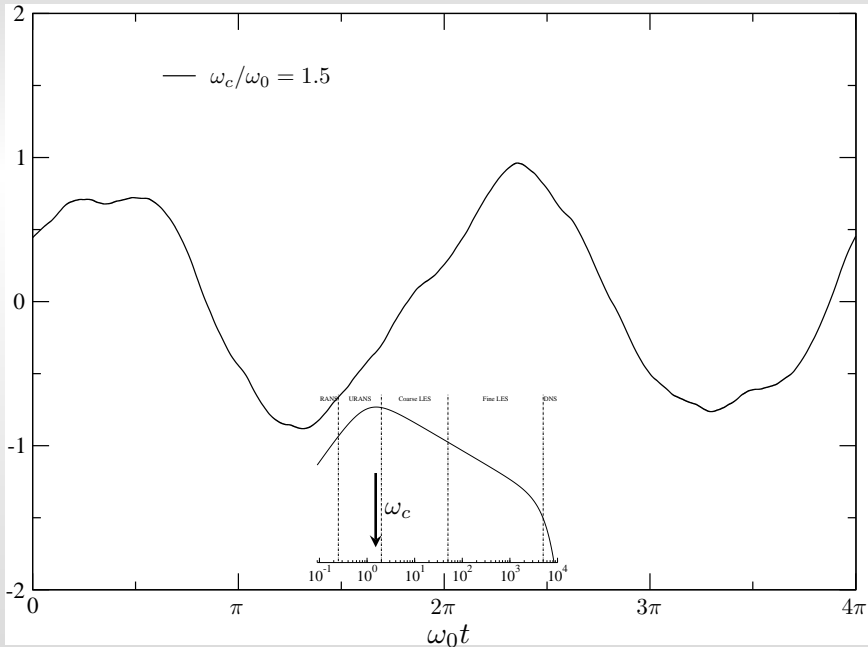


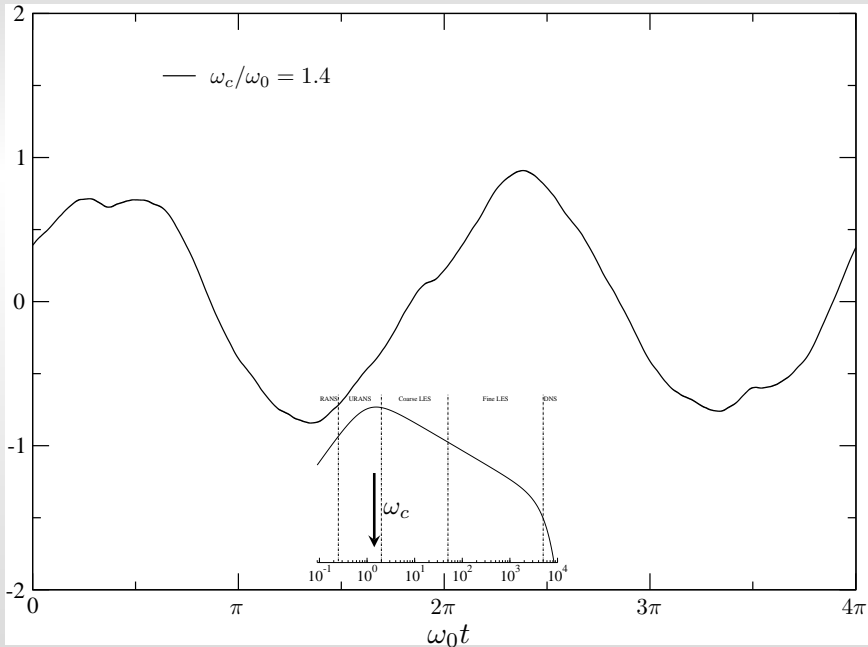


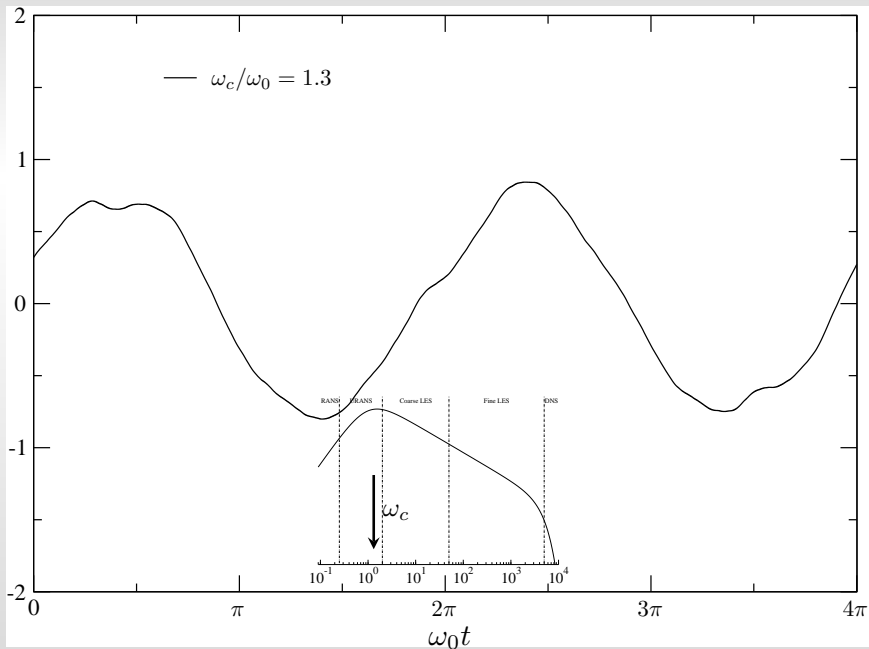


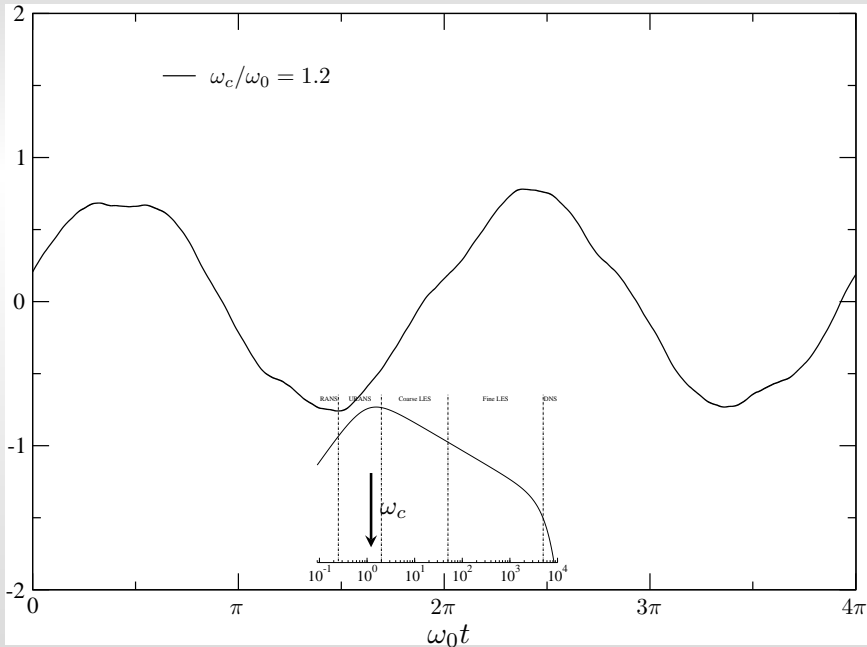


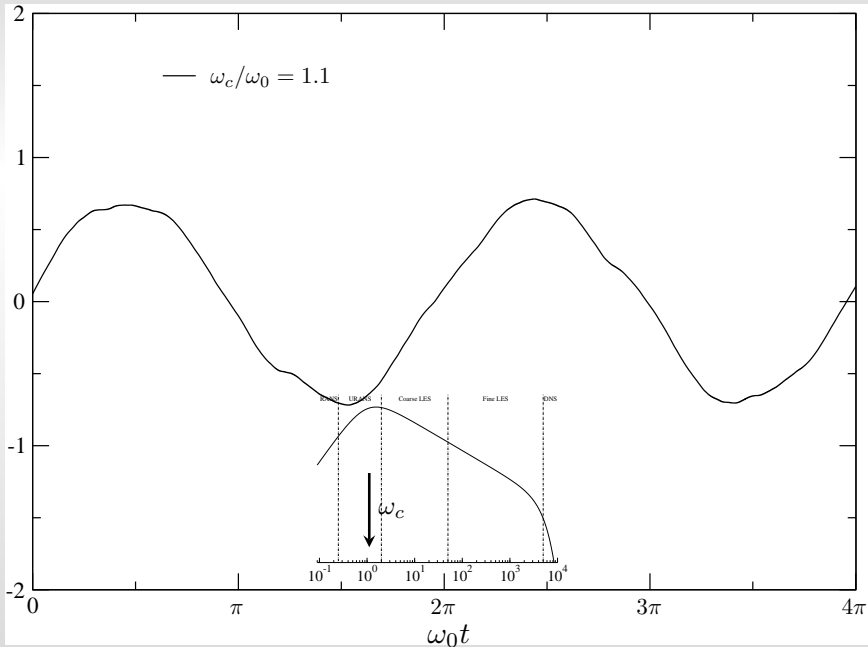


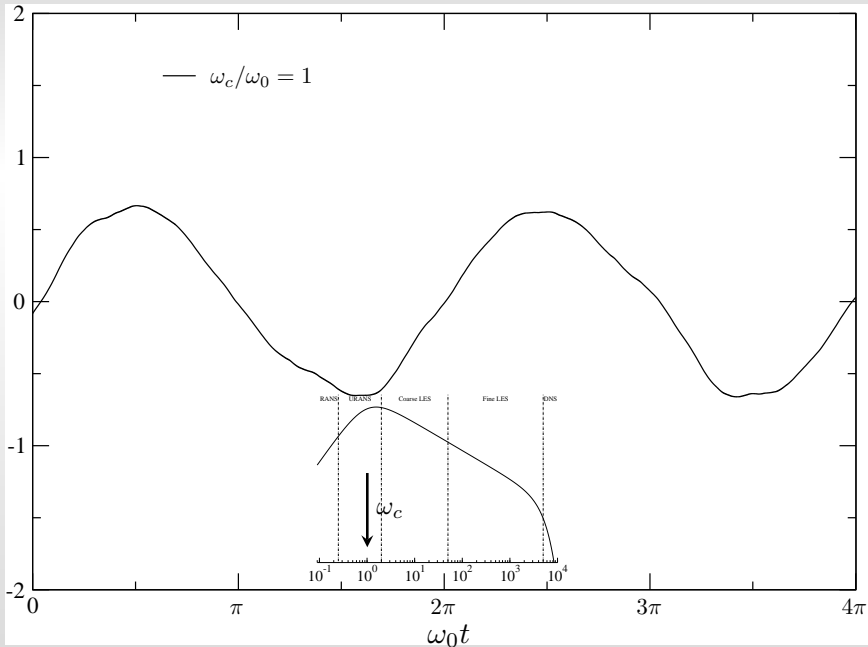


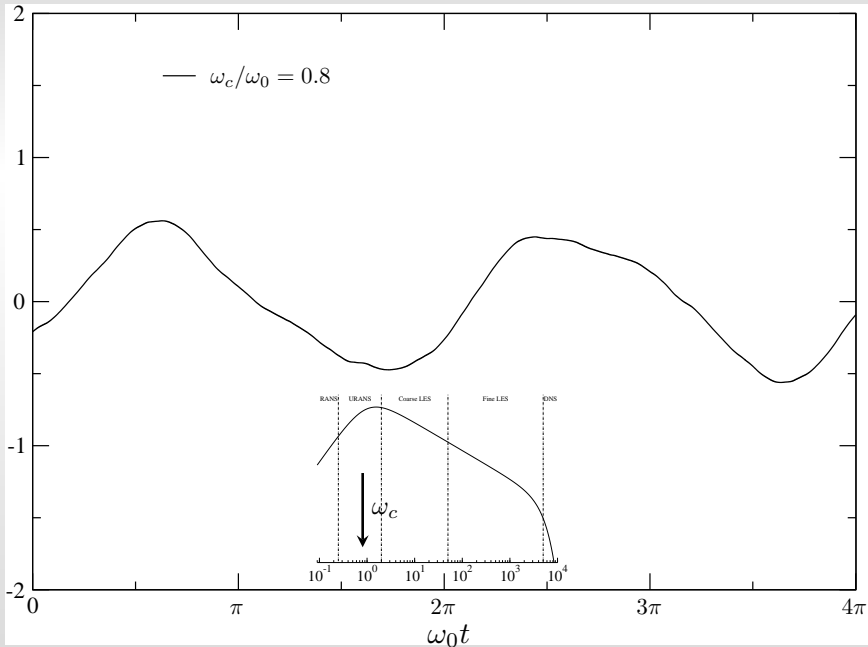


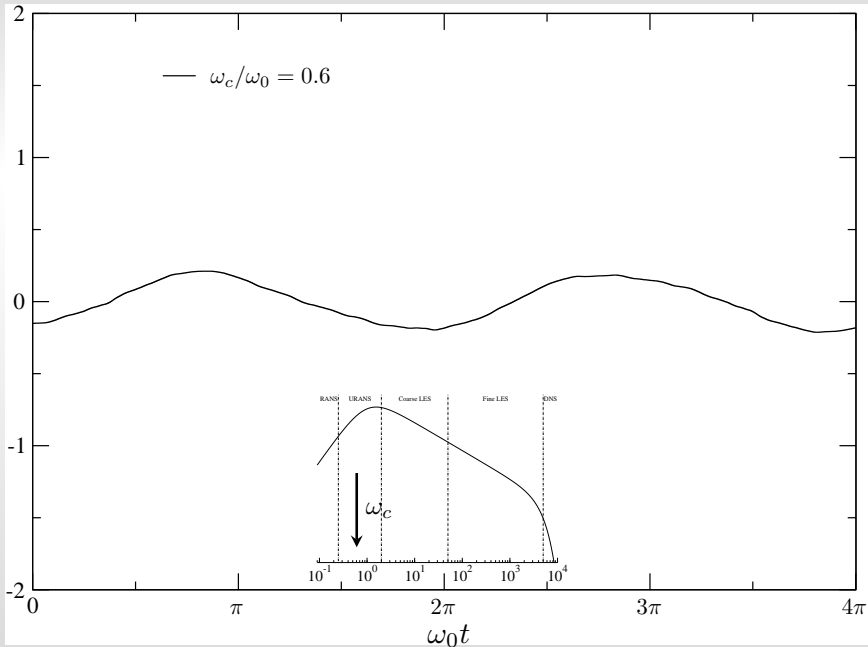


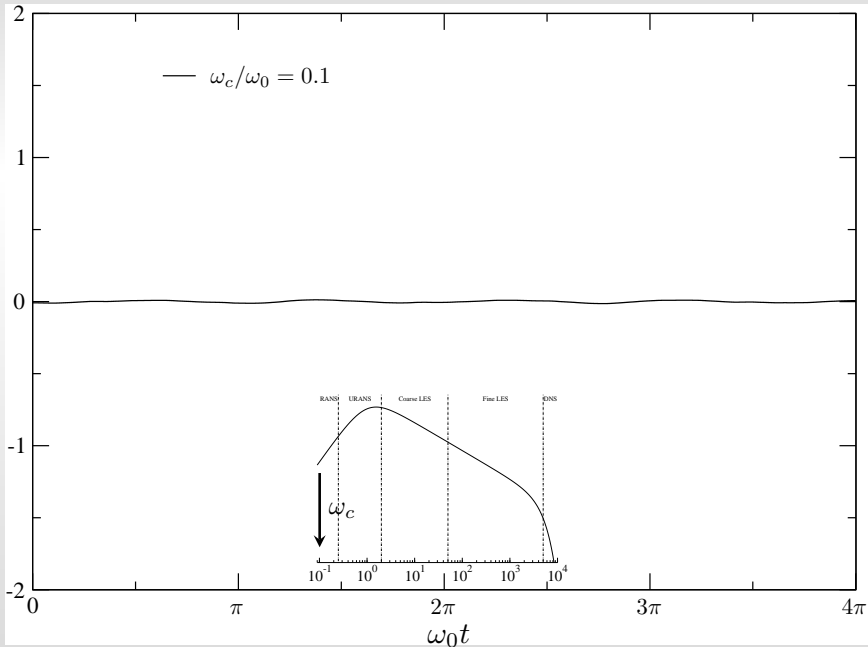


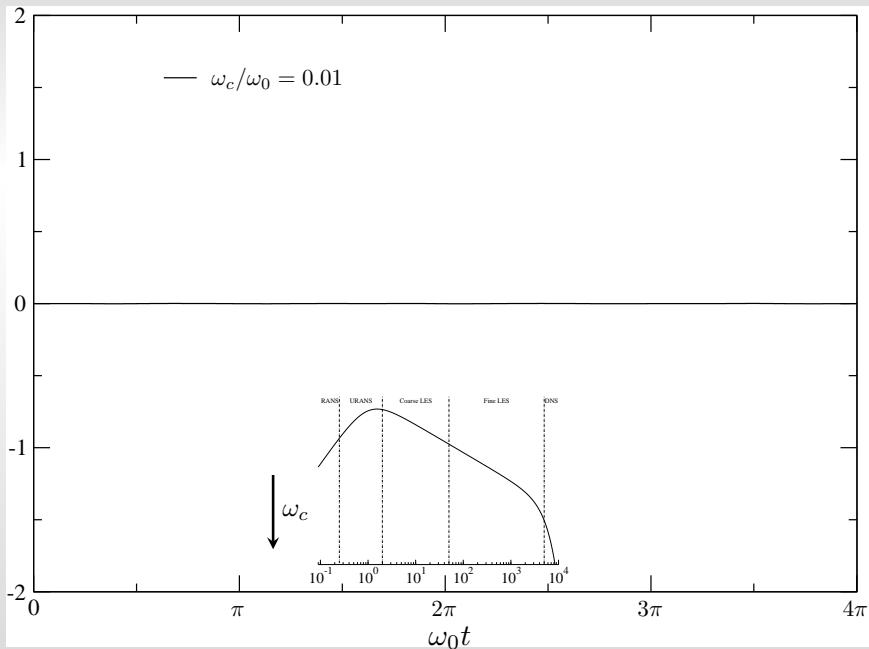












# Plan de la présentation

## 1 Comment définir un formalisme pour l'hybride RANS/LES ?

- ▷ Motivations et objectifs
- ▷ Formalismes possibles
- ▷ Filtrage temporel

## 2 Modélisation des tensions non-résolues

- ▷ Équations filtrées
- ▷ T-PITM
- ▷ HTLES
- ▷ Exemples d'applications

## 3 Approche active

- ▷ La perte d'énergie mécanique
- ▷ Injection d'énergie par forçage volumique
- ▷ Applications

## 4 Conclusions

## Équations filtrées temporellement

✓ Équation de la QDM filtrée :

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \tilde{u}_k \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij \text{ sfs}}}{\partial x_j}$$

✓ Équation de transport du tenseur de sous-filtre :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tau_{ij \text{ sfs}}}{\partial t} + \tilde{u}_k \frac{\partial \tau_{ij \text{ sfs}}}{\partial x_k} = & \underbrace{-\frac{\partial \tau(u_i, u_j, u_k)}{\partial x_k}}_{D_{ij \text{ sfs}}^T} + \underbrace{\nu \frac{\partial^2 \tau_{ij \text{ sfs}}}{\partial x_k \partial x_k}}_{D_{ij \text{ sfs}}^\nu} - \underbrace{2\nu \tau \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_k}, \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right)}_{\varepsilon_{ij \text{ sfs}}} \\ & \underbrace{-\frac{1}{\rho} \tau \left( u_i, \frac{\partial P}{\partial x_j} \right) - \frac{1}{\rho} \tau \left( u_j, \frac{\partial P}{\partial x_i} \right)}_{\phi_{ij \text{ sfs}}} - \underbrace{\tau_{ik \text{ sfs}} \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_k} - \tau_{jk \text{ sfs}} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_k}}_{P_{ij \text{ sfs}}}, \end{aligned}$$

▷ Utilise les moments centrés généralisés :  $\tau(u_i, u_j) = \widetilde{u_i u_j} - \tilde{u}_i \tilde{u}_j$   
 $\tau(u_i, u_j, u_k) = \widetilde{u_i u_j u_k} - \tilde{u}_i \tau(u_j, u_k) - \tilde{u}_j \tau(u_i, u_k) - \tilde{u}_k \tau(u_i, u_j) - \tilde{u}_i \tilde{u}_j \tilde{u}_k$

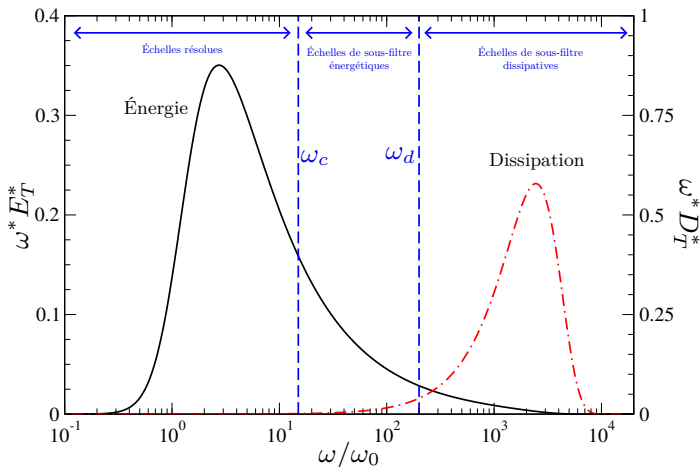
✓ Formellement identique aux équations pour le tenseur de Reynolds en RANS

✓ Similarité formelle + consistance à la limite des tailles de filtre infinies  
 ⇒ fondations solides pour développer des approches hybrides RANS/TLES

# Temporal PITM (T-PITM)

(Fadai-Ghotbi, Friess, Manceau, Gatski, and Borée, 2010b)

(PITM : Schiestel and Dejoan, 2005)



Trois zones spectrales  $[0, \omega_c]$ ,  $[\omega_c, \omega_d]$ ,  $[\omega_d, \infty]$

- ✓ Intégration partielle sur chacune des zones de l'équation de transport du spectre eulerien en fréquences  $E_T(\mathbf{x}, \omega)$

$$\frac{DE_T}{Dt} = \widehat{\mathbb{P}} + \widehat{\mathbb{D}} - \widehat{\mathbb{E}} + \widehat{\mathbb{T}}$$

| $[\omega_c, \omega_d]$                                 | $[\omega_d, \infty]$   |
|--|--|
| $k_m = \int_{\omega_c}^{\omega_d} E_T(\omega) d\omega$ | $0 = \int_{\omega_d}^{\infty} E_T(\omega) d\omega$   |
| $\frac{Dk_m}{Dt} = P_m - \varepsilon + D_m$            | $\frac{D\varepsilon}{Dt} = C_{\varepsilon_1} \frac{\varepsilon}{k_m} P_m - \underbrace{\left[ C_{\varepsilon_1} + r(C_{\varepsilon_2} - C_{\varepsilon_1}) \right]}_{C_{\varepsilon_2}^*(\omega_c)} \frac{\varepsilon^2}{k_m} + D_\varepsilon$ |

- ✓ Paramètre fondamental :  $r = \frac{k_m}{k_m + k_r}$
- ✓ Contrôle de la partition d'énergie (transition RANS  $\rightarrow$  TLES)
- ✓ Doit être relié à la fréquence de coupure  $\omega_c$

## Lien avec la fréquence de coupure

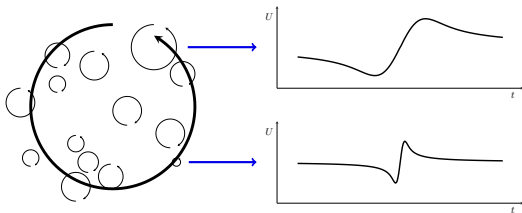
✓ Évaluation de  $r$  en fonction de  $\omega_c$ :

$$r = \frac{k_m}{k} = \frac{1}{k} \int_{\omega_c}^{\infty} E_T(\omega) d\omega$$

$E_T(\omega)$  = spectre eulerien en fréquences

✓ Spectre eulerien en fréquence

▷ Mécanisme de sweeping (Tennekes, 1975)



▷ Relation de dispersion :  $d\omega = U_S d\kappa$

▷  $U_s = U + \gamma\sqrt{k}$  est la vitesse de sweeping (Tennekes, 1975)

▷  $E(\kappa) = C_\kappa \varepsilon^{2/3} \kappa^{-5/3} \Rightarrow E_T(\omega) = C_\kappa \varepsilon^{2/3} U_S^{2/3} \omega^{-5/3}$

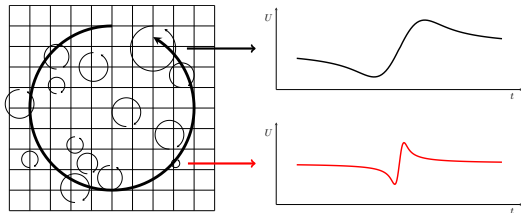
## Lien avec la fréquence de coupure

$$\checkmark \quad r = \frac{k_m}{k} = \frac{1}{k} \int_{\omega_c}^{\infty} E_T(\omega) d\omega \quad E_T(\omega) = C_\kappa \varepsilon^{2/3} U_S^{2/3} \omega^{-5/3}$$
$$\Rightarrow \quad r = \frac{1}{\beta} \left( \frac{U_s}{\sqrt{k}} \right)^{2/3} \left( \omega_c \frac{k}{\varepsilon} \right)^{-2/3}$$

✓ Fréquence de coupure  $\omega_c$  = plus haute fréquence résolue

▷ Coupure due au pas de temps  $dt$  :  $\omega_c = \frac{2\pi}{2dt}$

▷ Coupure due à la taille des mailles  $\Delta$  :  $\omega_c = U_s \kappa_c = U_s \frac{2\pi}{2\Delta}$



$$\Rightarrow \quad \omega_c = \min \left( \frac{\pi}{dt}; \frac{U_s \pi}{\Delta} \right)$$

## HTLES (Hybrid Temporal LES)

- ✓ T-PITM : difficultés à atteindre la partition d'énergie attendue (tendance à pseudo-laminariser)  $\Rightarrow$  approche dynamique (Fadai-Ghotbi et al., 2010b)
  - ▷ Problème dû au pilotage indirect de  $k_m$  (via l'équation de  $\varepsilon$ )
  - $\Rightarrow$  Modification de la forme du système d'équations

### T-PITM

$$\frac{dk_m}{dt} = P_m - \varepsilon + D_m$$
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k_m} P_m - C_{\varepsilon 2}^* \frac{\varepsilon^2}{k_m} - D_\varepsilon$$

### HTLES

$$\frac{dk_m}{dt} = P_m - \psi \varepsilon + D_m$$
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k_m} P_m - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k_m} - D_\varepsilon$$

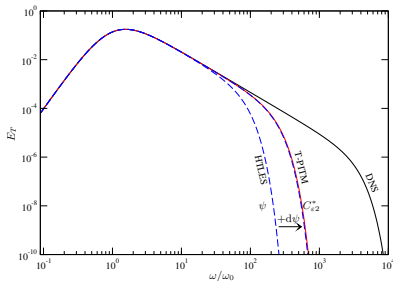
- ✓ Préserve les atouts du T-PITM :
  - ▷ Fondations solides, dérivation depuis les équations du mouvement
  - ▷ Méthodologie : H-equivalence

# Critère de H-équivalence

- ✓ On considère 2 approches hybrides :
  - ▷ Basées sur la même fermeture (même limite RANS)
  - ▷ Avec différentes méthodes de contrôle de la partition d'énergie

✓ Postulat (Friess, Manceau, and Gatski, 2015)

*Même niveau d'énergie modélisée  $\Rightarrow$  propriétés statistiques similaires du champ résolu*



✓ Fonction  $\psi$  qui donne la même énergie modélisée que la fonction  $C_{\varepsilon 2}^*$  ?

## Procédure

### T-PITM

$$\frac{dk_m}{dt} = P_m - \varepsilon + D_m$$
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k_m} P_m - C_{\varepsilon 2}^* \frac{\varepsilon^2}{k_m} - D_\varepsilon$$

### HTLES

$$\frac{dk_m}{dt} = P_m - \psi \varepsilon + D_m$$
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k_m} P_m - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k_m} - D_\varepsilon$$

- ✓ En partant du système RANS :  $C_{\varepsilon 2}^* = C_{\varepsilon 2}$  and  $\psi = 1$   
⇒ mêmes équations ⇒ même  $k_m$

- ✓ Introduction de variations infinitésimales  $dC_{\varepsilon 2}^*$  et  $d\psi$  (analyse en perturbations)

- ✓ Même variation  $dk_m$  si  $-\frac{C_{\varepsilon 2}}{C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1}\psi} d\psi = \frac{1}{C_{\varepsilon 2}^* - C_{\varepsilon 1}} dC_{\varepsilon 2}^*$

- ✓ Par intégration : H-équivalent si  $\psi = \frac{C_{\varepsilon 2}}{C_{\varepsilon 1} + r(C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1})}$

## HTLES

$$\checkmark T_m = \frac{r}{\psi(r)} \frac{k}{\varepsilon_m^*} \quad \text{avec} \quad \psi = \frac{C_{\varepsilon 2}}{C_{\varepsilon 1} + r(C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1})}$$

$$r = \frac{1}{\beta} \left( \frac{U_s}{\sqrt{k}} \right)^{2/3} \left( \omega_c \frac{k}{\varepsilon} \right)^{-2/3} \quad \omega_c = \min \left( \frac{\pi}{dt}; \frac{U_s \pi}{\Delta} \right)$$

✓ Modèles à viscosité turbulente :

$$\begin{aligned} \nu_t^{\text{sfs}} &= C_\mu \frac{k_{\text{sfs}}^2}{\psi \varepsilon_{\text{sfs}}} \\ \frac{dk_{\text{sfs}}}{dt} &= P_{\text{sfs}} + D_{\text{sfs}} - \frac{k_{\text{sfs}}}{T} \\ \frac{d\varepsilon_{\text{sfs}}}{dt} &= \text{standard} \end{aligned}$$

✓ Modèles au second ordre :

$$\begin{aligned} \frac{d\tau_{ij}^{\text{sfs}}}{dt} &= P_{ij}^{\text{sfs}} + \phi_{ij}^{*\text{sfs}} + D_{ij}^{\text{sfs}} - \frac{k_{\text{sfs}}}{T} \frac{\varepsilon_{ij}^{\text{sfs}}}{\varepsilon_{\text{sfs}}} \\ \frac{d\varepsilon_{\text{sfs}}}{dt} &= \text{standard} \end{aligned}$$

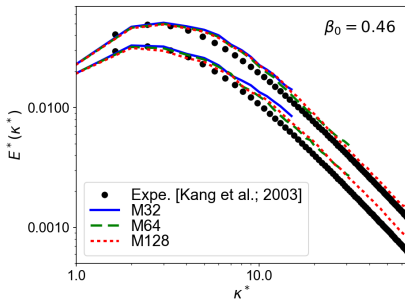
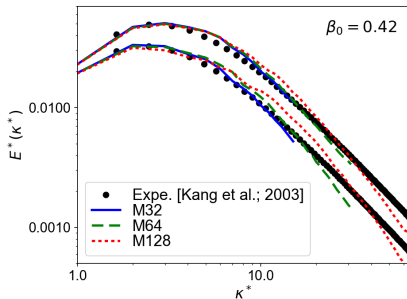
# Calibration

✓ Modèle RANS sous-jacent  $k-\omega$  SST (Menter, 1994)

✓ Calibration de  $\beta$  : 
$$r = \frac{1}{\beta} \left( \frac{U_s}{\sqrt{k}} \right)^{2/3} \left( \omega_c \frac{k}{\varepsilon} \right)^{-2/3}$$

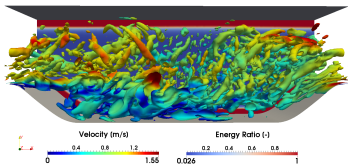
✓ Cas de la décroissance de turbulence homogène  $Re_\lambda = 720$ , par rapport aux données expérimentales de Kang et al., 2003

✓ code\_saturne, développé par EDF (Archambeau et al., 2004)

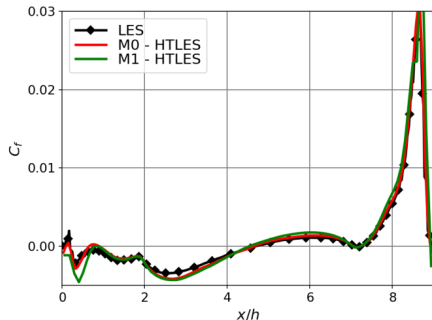
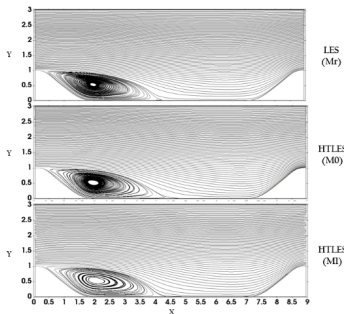


# Exemples d'applications

Collines périodiques (Duffal, de Laage de Meux, and Manceau, 2022)

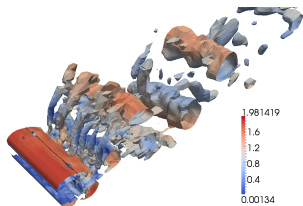


- ✓  $Re_b = 10600$
- ✓ LES réf. de Breuer et al., 2006 avec  $12 \times 10^6$  cellules
- ✓ Code\_Saturne
- ✓ HTLES -  $k-\omega$ -SST et HTLES -  $BL-\overline{v^2}/k$
- ✓  $M0=160 \times 160 \times 80 = 2 \times 10^6$  cellules (facteur 6)
- ✓  $M1=80 \times 80 \times 40 = 256,000$  cellules (facteur 50)

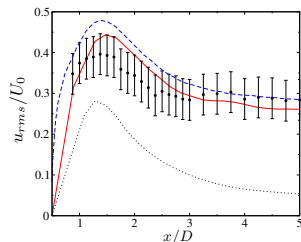
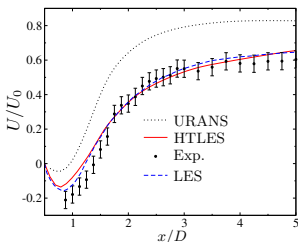


## Exemples d'applications

Cylindre à section carrée (Tran, Manceau, Perrin, Borée, and Nguyen, 2012)



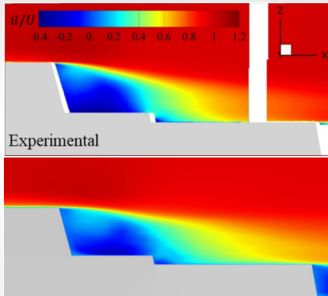
- ✓  $Re = 21400$
- ✓ Code\_Saturne
- ✓ HTLES -  $k-\omega$ -SST
- ✓  $0.5 \times 10^6$  cellules



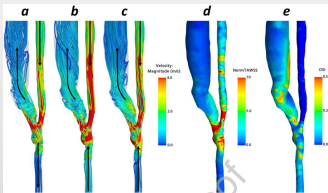
- ✓ Exp.: Lyn et al., 1995
- ✓ LES: Cao and Tamura, 2016 avec  $75 \times 10^6$  cellules (facteur 150)

# Exemples d'applications

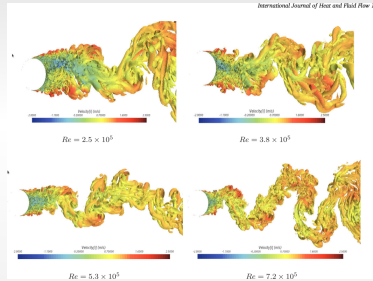
Code commercial StarCCM+



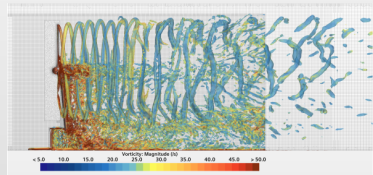
Sillage d'une frégate (Mucha, 2021)



Fistule artério-veineuse (Hyde-Linaker et al., 2022)



Crise de traînée derrière un cylindre (Mays et al., 2023)



Aérodynamique d'une éolienne (Sileo et al., 2023)

# Plan de la présentation

## 1 Comment définir un formalisme pour l'hybride RANS/LES ?

- ▷ Motivations et objectifs
- ▷ Formalismes possibles
- ▷ Filtrage temporel

## 2 Modélisation des tensions non-résolues

- ▷ Équations filtrées
- ▷ T-PITM
- ▷ HTLES
- ▷ Exemples d'applications

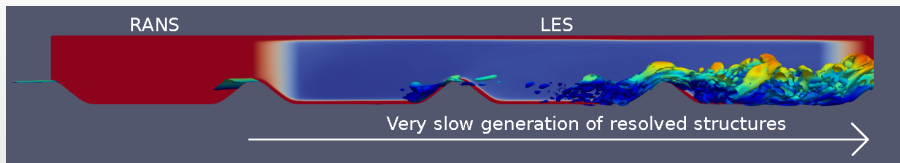
## 3 Approche active

- ▷ La perte d'énergie mécanique
- ▷ Injection d'énergie par forçage volumique
- ▷ Applications

## 4 Conclusions

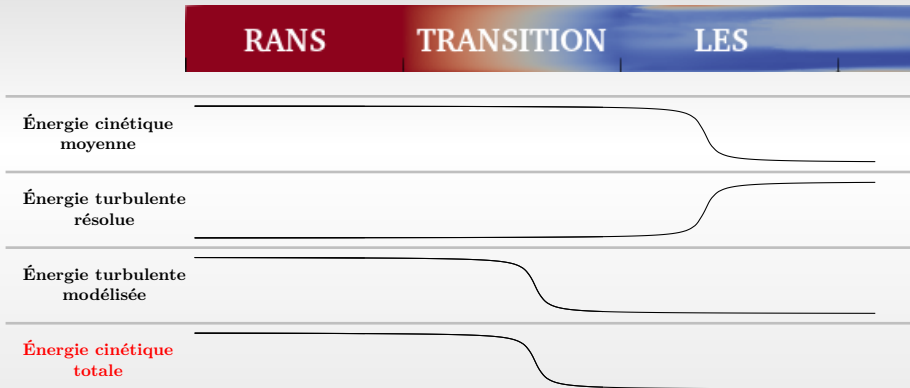
## Problème de zone grise

- ✓ Tous les modèles hybrides RANS/LES : réduction des tensions modélisées pour passer en mode LES
- ✓ Est censé être compensé par l'augmentation des tensions résolues



- ✓ Problème de *zone grise* ou *Modelled stress depletion*

## Le problème de l'énergie fluctuante



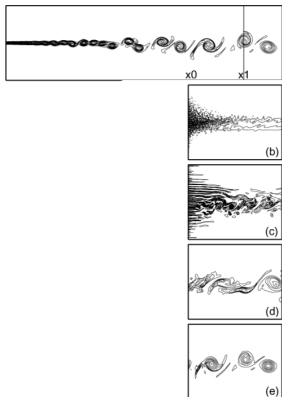
⇒ Perte fondamentale d'énergie mécanique !

⇒ Changer le modèle pour l'énergie non-résolue n'est d'aucune aide

⇒ De l'énergie doit être injectée dans la région de transition RANS-à-LES

## Comment injecter de l'énergie ?

- ✓ Injection directe de structures en conditions d'entrées/d'interface
- ✓ Turbulence synthétique: doit "ressembler" à de la turbulence
- ✓ Seulement applicable en "zonal"



D'après Druault, Lardeau, Bonnet, Coiffet, Delville, Lamballais, Largeau, and Perret, 2004

- ✓ Ajouter une force dans l'équation de la QDM résolue

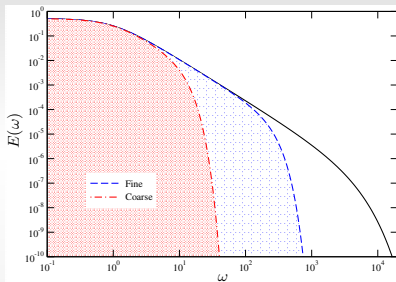
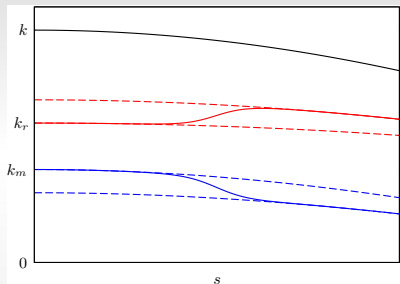
$$\frac{d\tilde{u}_i}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} [2(\nu + \nu_{\text{sfs}}) \tilde{s}_{ik}] + f_i$$

- ✓ Injection d'énergie = travail de la force

$$P_f = \frac{\partial E_f}{\partial t} = f_i \tilde{u}_i$$

- ✓ Applicable quelle que soit l'approche

# Mécanisme de transfert continu d'énergie



✓ Raffinement  $\Rightarrow$  transfert d'énergie de  $k_m$  vers  $k_r$   $\Rightarrow$  certaines variables dépendent fondamentalement de  $\Delta$

✓ En considérant :  $\phi(t, x_i, \Delta)$

✓ Dérivée totale :

$$\frac{d\phi}{dt} = \underbrace{\frac{\partial\phi}{\partial t} + \nabla\phi \cdot \mathbf{U}}_{\text{Contribution de la dynamique}} + \underbrace{\frac{\partial\phi}{\partial\Delta} \frac{d\Delta}{dt}}_{\text{Contribution due au raffinement}} \quad (1)$$

## Mécanisme de transfert continu d'énergie

✓  $\frac{\partial k_m}{\partial \Delta} \frac{d\Delta}{dt}$       transfert d'énergie de  $k_m$  vers  $k_r$  dû au raffinement  $d\Delta/dt$  le long d'une ligne de courant

✓ Estimation de  $\frac{\partial k_m}{\partial \Delta}$  à partir d'un spectre générique :

$$k_m = \frac{3C_K \varepsilon^{2/3}}{2\pi^{2/3}} \Delta^{2/3} \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial k_m}{\partial \Delta} = \frac{2}{3\Delta} k_m$$

# Méthode hybride RANS/LES active

(Mehta, Manceau, Duffal, and de Laage de Meux, 2023)

✓ Force dans l'équation de QDM résolue :  $f_i = A_{ij}\tilde{u}_j + B_i$

✓ Avec  $A_{ij}$  et  $B_i$  donnés en chaque point par le système  $9 \times 9$

$$\begin{cases} A_{ij}\overline{\tilde{u}_j} + B_i & = & 0 \\ A_{ik}\overline{u'_j u'_k} + A_{jk}\overline{u'_i u'_k} & = & -\frac{2}{3}\tau_{ij}^m \frac{1}{\Delta} \frac{d\Delta}{dt} \end{cases}$$

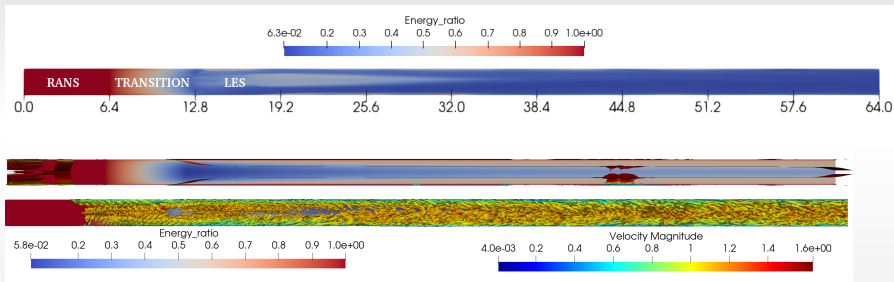
✓ N'influence pas la vitesse moyenne

✓ Transfère la bonne quantité d'énergie de  $k_m$  vers  $k_r$  due au raffinement

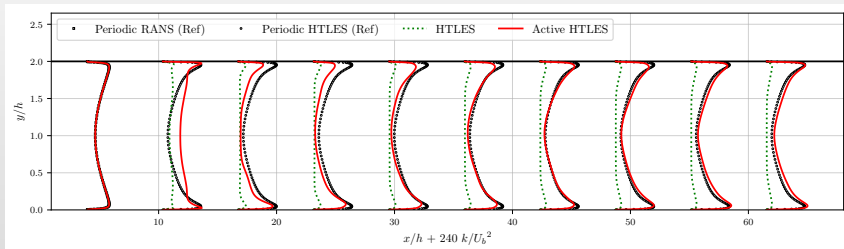
⇒ Résout le problème de la perte d'énergie

# Application à un écoulement en canal

(Modèle hybride = HTLES)

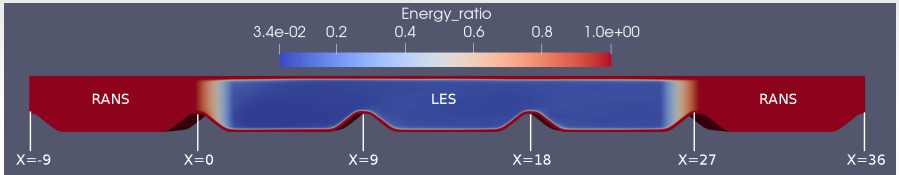


Isosurfaces  $Q = 0.05U_b^2/h^2$



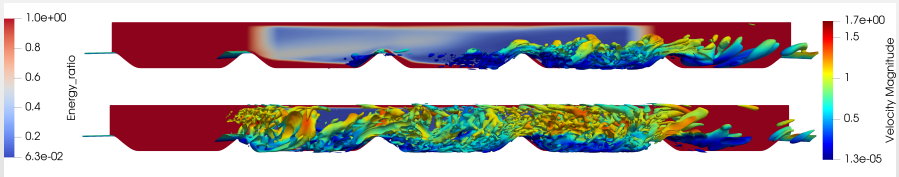
Profils d'énergie turbulente totale (résolue+modélisée)

# Collines

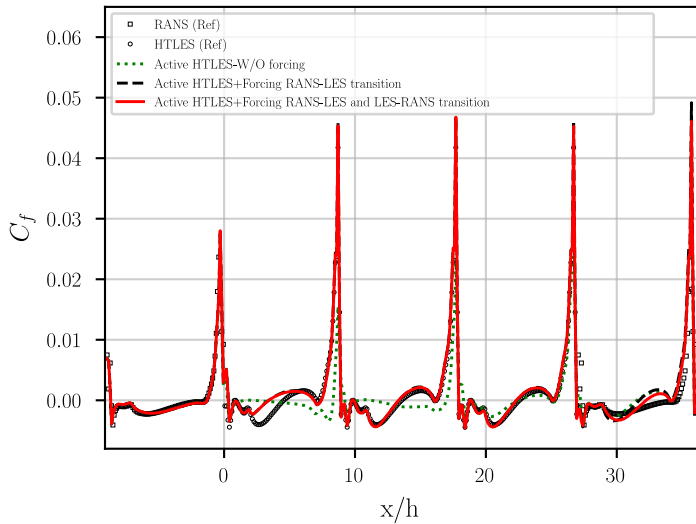


✓ Sans forçage

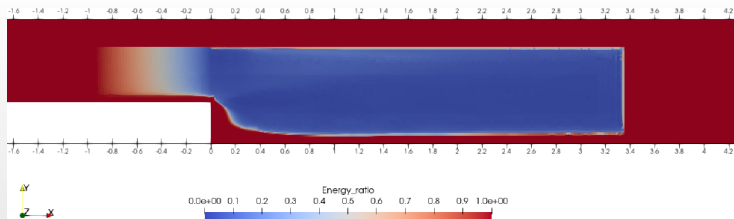
✓ Avec forçage



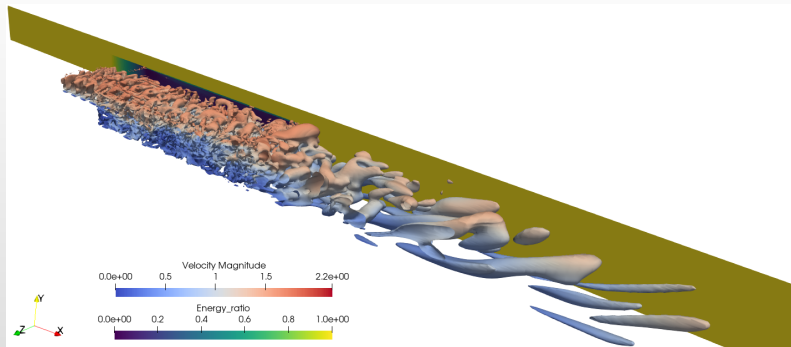
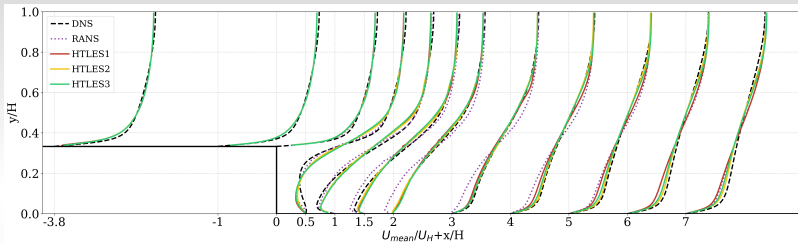
# Collines



# Marche descendante



Isocontours de la partition d'énergie ( $r$ )



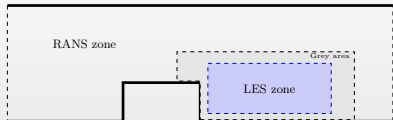
# Projets en cours

- ✓ Application à un jet en crossflow

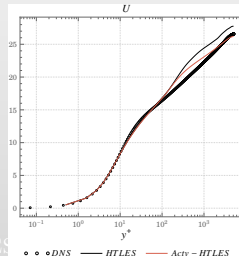


Iso-surfaces du critère Q  
(Mastripolito, Manceau, and Bruel, 2022)

- ✓ Application à un cube posé sur une paroi



- ✓ Forçage aux interfaces tangentielles
  - ▷ Transfert d'énergie venant des termes de diffusion
  - ▷ Réduction du log-layer mismatch



# Plan de la présentation

## 1 Comment définir un formalisme pour l'hybride RANS/LES ?

- ▷ Motivations et objectifs
- ▷ Formalismes possibles
- ▷ Filtrage temporel

## 2 Modélisation des tensions non-résolues

- ▷ Équations filtrées
- ▷ T-PITM
- ▷ HTLES
- ▷ Exemples d'applications

## 3 Approche active

- ▷ La perte d'énergie mécanique
- ▷ Injection d'énergie par forçage volumique
- ▷ Applications

## 4 Conclusions

## Conclusions

- ✓ Filtrage temporel :
  - ▷ Formalisme cohérent pour l'hybride RANS/LES
  - ▷ Applicable à toutes les situations (même les écoulements transitoires/cycliques)
- ✓ Rend possible la dérivation d'un modèle à partir des équations du mouvement :
  - ▷ Conduit à des modèles hybrides basés sur des modèles RANS modifiés
  - ▷ Soit à viscosité turbulente, soit au second ordre (RSM)
  - ▷ Relativement simple à implémenter, stable (déjà disponible dans code\_saturne et StarCCM+)
  - ▷ Testé avec succès dans des configurations variées
- ✓ L'approche active :
  - ▷ Résout le problème de la perte d'énergie à la transition de RANS à LES
  - ▷ Rend la LES embarquée continue possible
  - ▷ Ne dépend pas de la forme de la région LES  $\Rightarrow$  rend possible les approches auto-adaptatives

## Co-authors

- ✓ Carpy and Manceau (2006)
- ✓ Fadai-Ghotbi, Friess, Manceau, and Borée (2010a)
- ✓ Fadai-Ghotbi, Friess, Manceau, Gatski, and Borée (2010b)
- ✓ Bentaleb and Manceau (2011)
- ✓ Tran, Manceau, Perrin, Borée, and Nguyen (2012)
- ✓ Friess, Manceau, and Gatski (2015)
- ✓ de Laage de Meux, Audebert, Manceau, and Perrin (2015)
- ✓ Afailal, Galpin, Velghe, and Manceau (2019)
- ✓ Duffal, de Laage de Meux, and Manceau (2022)
- ✓ Mehta, Manceau, Duffal, and de Laage de Meux (2023)
- ✓ David, Mehta, and Manceau (2024)

## Remerciements

- ✓ Simulation tool: Code\_Saturne (**Saturne2004**).
- ✓ Computing resources: MCIA, Bordeaux and GENCI (Grant 2022-A0122A10980).
- ✓ ASTURIES project (grant E2S-20-ScientificChallenges-01) of E2S UPPA (ANR-16-IDEX-0002).

## Bibliographie

- Travin, A., M. Shur, M. Strelets, and P.R. Spalart (2002). “Advances in LES of Complex Flows”. In: ed. by R. Friedrich and W. Rodi. New York: Kluwer Acad. Chap. Physical and Numerical Upgrades in the Detached-Eddy Simulation of Complex Turbulent Flows, pp. 239–254.
- Germano, M. (2004). “Properties of the hybrid RANS/LES filter”. In: *Theor. Comput. Fluid Dyn.* 17.4, pp. 225–231.
- Fadai-Ghotbi, A., Ch. Friess, R. Manceau, T.B. Gatski, and J. Borée (2010b). “Temporal filtering: a consistent formalism for seamless hybrid RANS-LES modeling in inhomogeneous turbulence”. In: *Int. J. Heat Fluid Fl.* 31.3, pp. 378–389.
- Kampé de Fériet, J. and R. Betchov (1951). “Theoretical and experimental averages of turbulent functions”. In: *Proc. K. Ned. Akad. Wet.* 53, pp. 389–398.
- Pruett, C. D. (2000). “Eulerian time-domain filtering for spatial large-eddy simulation”. In: *AIAA J.* 38.9, pp. 1634–1642.
- Pruett, C. D., T. B. Gatski, C. E. Grosch, and W. D. Thacker (2003). “The temporally filtered Navier-Stokes equations: Properties of the residual stress”. In: *Phys. Fluids* 15.8, pp. 2127–2140.
- Schiestel, R. and A. Dejoan (2005). “Towards a new partially integrated transport model for coarse grid and unsteady turbulent flow simulations”. In: *Theor. Comput. Fluid Dyn.* 18.6, pp. 443–468.
- Tennekes, H. (1975). “Eulerian and Lagrangian time microscales in isotropic turbulence”. In: *J. Fluid Mech.* 67, pp. 561–567.
- Friess, Ch., R. Manceau, and T.B. Gatski (2015). “Toward an equivalence criterion for hybrid RANS/LES methods”. In: *Comput. Fluids* 122, pp. 233–246.
- Menter, F. R. (1994). “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications”. In: *AIAA J.* 32.8, pp. 1598–1605.
- Kang, Hyung Suk, Stuart Chester, and Charles Meneveau (2003). “Decaying turbulence in an active-grid-generated flow and comparisons with large-eddy simulation”. In: *J. Fluid Mech.* 480, pp. 129–160.

- Arhambeau, F., N. Méchitoua, and M. Sakiz (2004). “Code Saturne: A Finite Volume Code for the Computation of Turbulent Incompressible flows - Industrial Applications”. In: *Int. J. on Finite Volume, Electronical edition: <http://averoes.math.univ-paris13.fr/html>* ISSN 1634.0655.
- Duffal, V., B. de Laage de Meux, and R. Manceau (2022). “Development and Validation of a new formulation of Hybrid Temporal Large Eddy Simulation”. In: *Flow Turbul. Combust.* 108, p. 42.
- Breuer, M., B. Jaffrézic, N. Peller, M. Manhart, J. Fröhlich, Ch. Hinterberger, W. Rodi, G.B. Deng, O. Chikhaoui, S. Jakirlić, et al. (2006). “A comparative study of the turbulent flow over a periodic arrangement of smoothly contoured hills”. In: *Direct and Large-Eddy Simulation VI*. Springer, pp. 635–642.
- Tran, T.T., R. Manceau, R. Perrin, J. Borée, and A.T. Nguyen (2012). “A hybrid temporal LES approach. Application to flows around rectangular cylinders”. In: *Proc. 9th ERCOFTAC Int. Symp. on Eng. Turb. Modelling and Measurements, Thessaloniki, Greece*.
- Lyn, D.A., S. Einav, W. Rodi, and J.-H. Park (1995). “Laser-Doppler velocimetry study of ensemble-averaged characteristics of the turbulent near wake of a square cylinder”. In: *J. Fluid Mech.* 304, pp. 285–319.
- Cao, Y. and T. Tamura (2016). “Large-eddy simulations of flow past a square cylinder using structured and unstructured grids”. In: *Comput. Fluids* 137, pp. 36–54.
- Mucha, Ph. (Oct. 2021). “Application of Hybrid-Temporal LES to Airwake Analyses of the ONR Tumblehome Surface Combatant”. In:
- Mays, M.D., S. Lardeau, and S. Laizet (2023). “Capturing the drag crisis in the flow around a smooth cylinder using a hybrid RANS-LES model on coarse meshes”. In: *Int. J. Heat Fluid Fl.* 103, p. 109203.
- Hyde-Linaker, G., P. Hall Barientos, S. Stoumpos, D.B. Kingsmore, and A. Kazakidi (2022). “Patient-specific computational haemodynamics associated with the surgical creation of an arteriovenous fistula”. In: *Med. Eng. Phys.*, p. 103814. ISSN: 1350-4533.

- Sileo, Lucia, Tiago Gomes, Vladimir Krasilnikov, and António Maximiano (2023). “Towards the CFD Validation and Analysis of Aerodynamic Loads Acting on the Rotor of a Floating Wind Turbine Subject to Forced Motions”. In: *Proc. 25th Numerical Towing Tank Symposium (NuTTS)*, Ericeira, Portugal.
- Druault, P., S. Lardeau, J.-P. Bonnet, F. Coiffet, J. Delville, E. Lamballais, J.F. Largeau, and L. Perret (2004). “Generation of Three-Dimensional Turbulent Inlet Conditions for Large-Eddy Simulation”. In: *AIAA J.* 42.3, pp. 447–456.
- Mehta, Mahitosh, Rémi Manceau, Vladimir Duffal, and Benoît de Laage de Meux (2023). “An active hybrid Reynolds-Averaged Navier-Stokes/Large Eddy Simulation approach for gray area mitigation”. In: *Phys. Fluids* 35.12, p. 125116.
- Mastripiolito, R., R. Manceau, and P. Bruel (2022). “Modélisation des effets de giration pour les jets en écoulement transverse”. In: *Journée thématique SFT : Aérothermique des systèmes propulsifs pour l’aéronautique, Paris, France*.
- Carpy, S. and R. Manceau (2006). “Turbulence modelling of statistically periodic flows: synthetic jet into quiescent air”. In: *Int. J. Heat Fluid Fl.* 27, pp. 756–767.
- Fadai-Ghotbi, A., Ch. Friess, R. Manceau, and J. Borée (2010a). “A seamless hybrid RANS-LES model based on transport equations for the subgrid stresses and elliptic blending”. In: *Phys. Fluids* 22.055104.
- Bentaleb, Y. and R. Manceau (2011). “A hybrid Temporal LES/RANS formulation based on a two-equation subfilter model”. In: *Proc. 7th Int. Symp. Turb. Shear Flow Phenomena, Ottawa, Canada*.
- de Laage de Meux, B., B. Audebert, R. Manceau, and R. Perrin (2015). “Anisotropic Linear Forcing for synthetic turbulence generation in LES and hybrid RANS/LES modeling”. In: *Phys. Fluids* 27.035115.
- Afailal, H., J. Galpin, A. Velghe, and R. Manceau (2019). “Development and validation of a hybrid temporal LES model in the perspective of applications to internal combustion engines”. In: *Oil Gas Sci. Technol.* 74.56, p. 16.
- David, Martin, Mahitosh Mehta, and Rémi Manceau (2024). “On the feasibility of a self-adaptive strategy for hybrid RANS/LES based on physical criteria and its initial testing on low Reynolds number backward-facing step flow”. In: *Flow Turbul. Combust.* In press.

- Spalart, P.R. (2009). “Detached-eddy simulation”. In: *Annu. Rev. Fluid Mech.* 41, pp. 181–202.
- Speziale, C. G. (1987). “On the decomposition of turbulent flow fields for the analysis of coherent structures”. In: *Acta Mechanica* 70.1-4, pp. 243–250.
- Meneveau, C., T.S. Lund, and W.H. Cabot (1996). “A Lagrangian dynamic subgrid-scale model of turbulence”. In: *J. Fluid Mech.* 319, pp. 353–385.