



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 Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Modélisation hybride RANS/LES

Du formalisme aux applications

RÉMI MANCEAU
DR CNRS

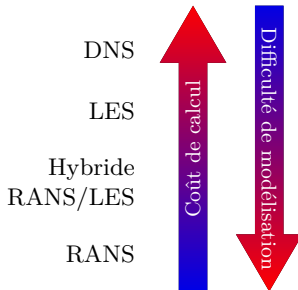


*Laboratoire de mathématiques et de leurs applications de Pau (LMAP)
UMR 5142 CNRS-Université de Pau
Équipe-projet Inria Cagire*

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

Contexte

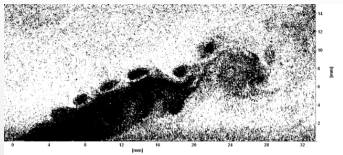
- ✓ Écoulements turbulents :
 - ▷ Compromis coût/précision
 - ▷ Choix cruciaux : modèle + méthodes numériques



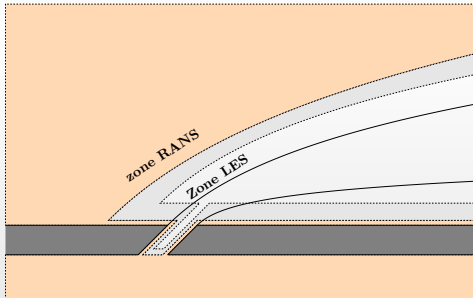
- ✓ Industrie : insuffisance modèles statistiques (RANS) + coûts prohibitif LES
 - ▷ Approche combinant les avantages des 2 types de modèles : **hybride RANS/LES**

Principe de l'hybride RANS/LES

Objectif



Banc MAVERIC

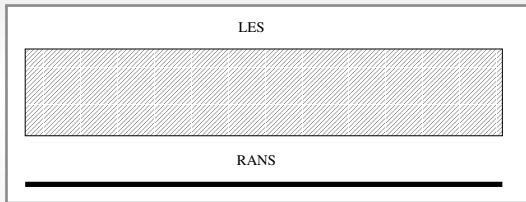


Hybride RANS/LES \simeq approche multi-échelles

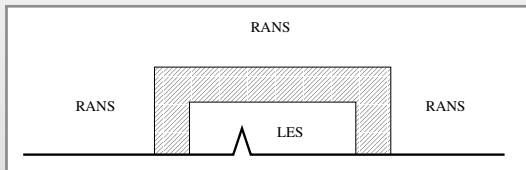
Principe de l'hybride RANS/LES

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 : τ_{ij} = tenseur de Reynolds LES : τ_{ij} = tenseur de sous-maille

✓ Objectifs

▷ Définir un opérateur raccordant les deux approches

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

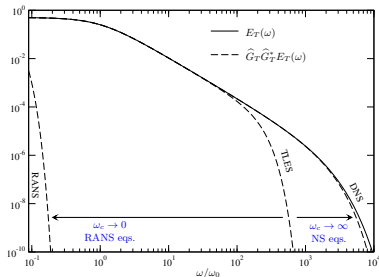
▷ Turbulence inhomogène : $\bar{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t) = \lim_{\Delta_s \rightarrow \infty} \tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t)$

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

▷ Filtrage temporel :

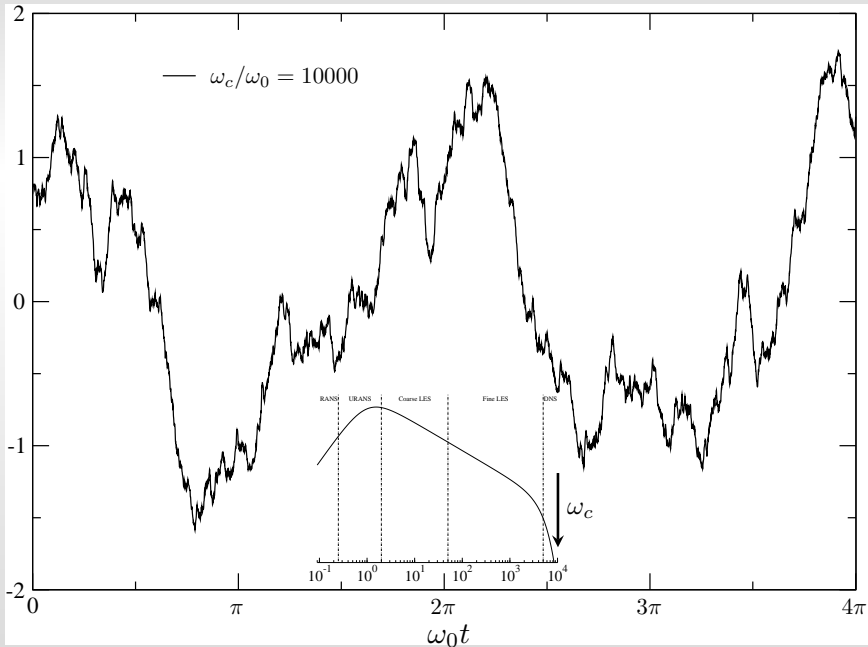
$$\tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t) = \int_{-\infty}^t G_T(t, t') \mathbf{u}(\mathbf{x}, t') dt'$$

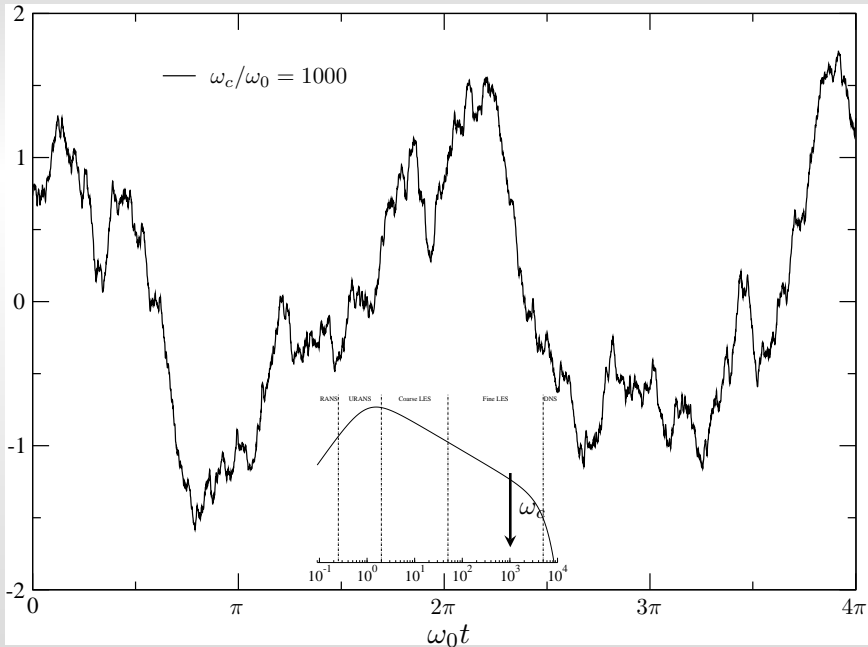
$$\bar{\mathbf{u}}(\mathbf{x}) = \lim_{\Delta_T \rightarrow \infty} \tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t)$$

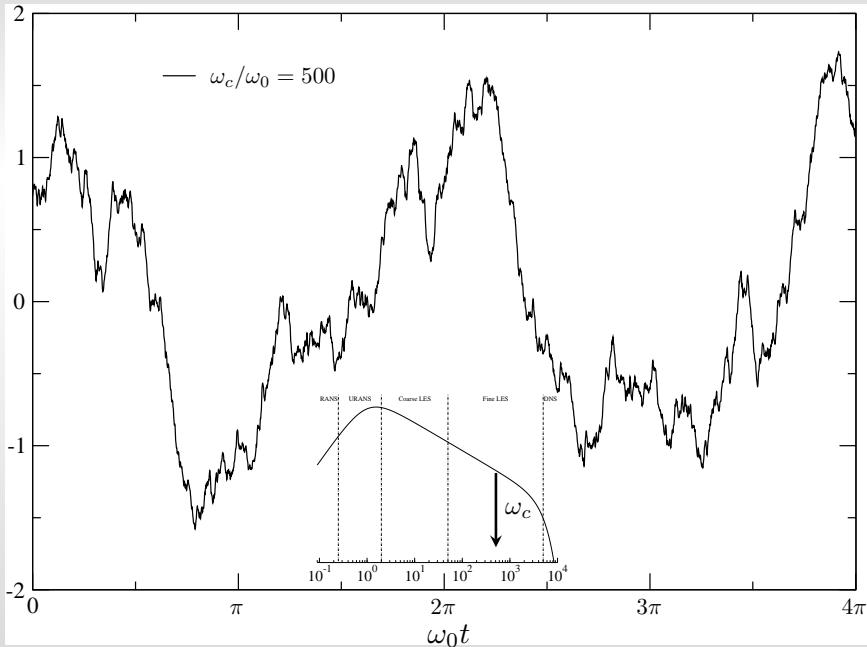


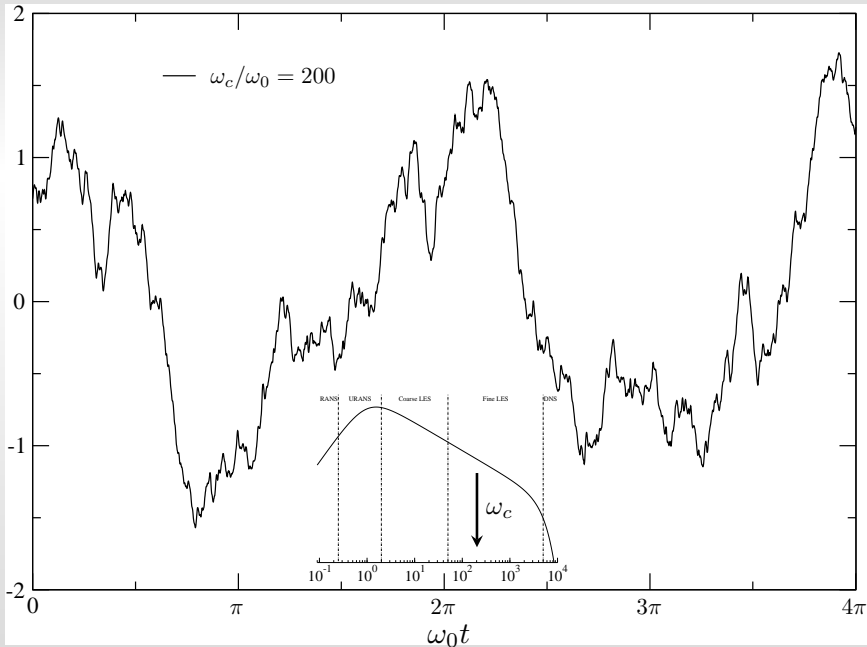
✓ $\omega_c \rightarrow 0$: Les tensions de sous-filtre tendent vers les tensions de Reynolds (Pruett et al., 2003) \Rightarrow les équations RANS sont retrouvées

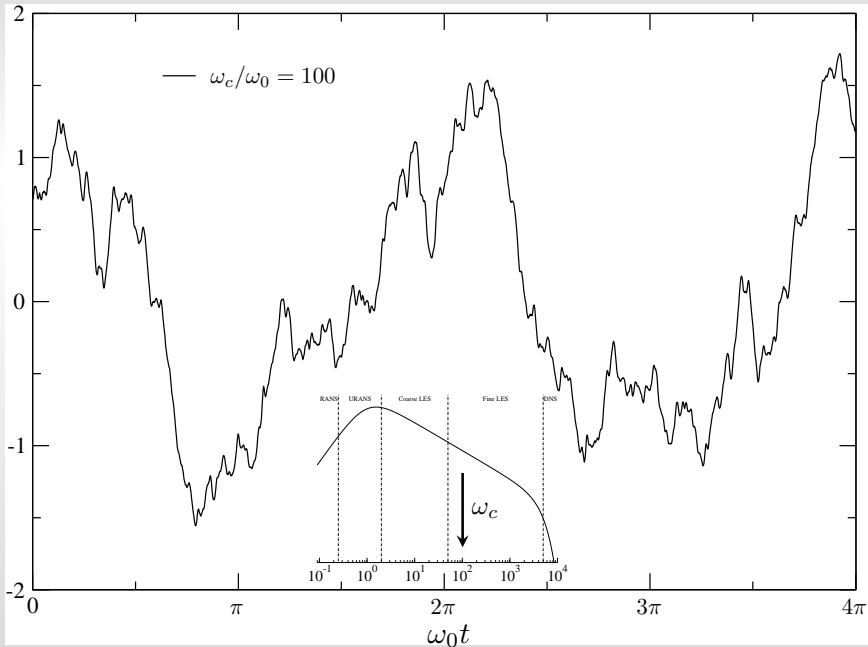
✓ $\omega_c \rightarrow \infty$: Les tensions de sous-filtre tendent vers zéro \Rightarrow les équations de Navier-Stokes sont retrouvées

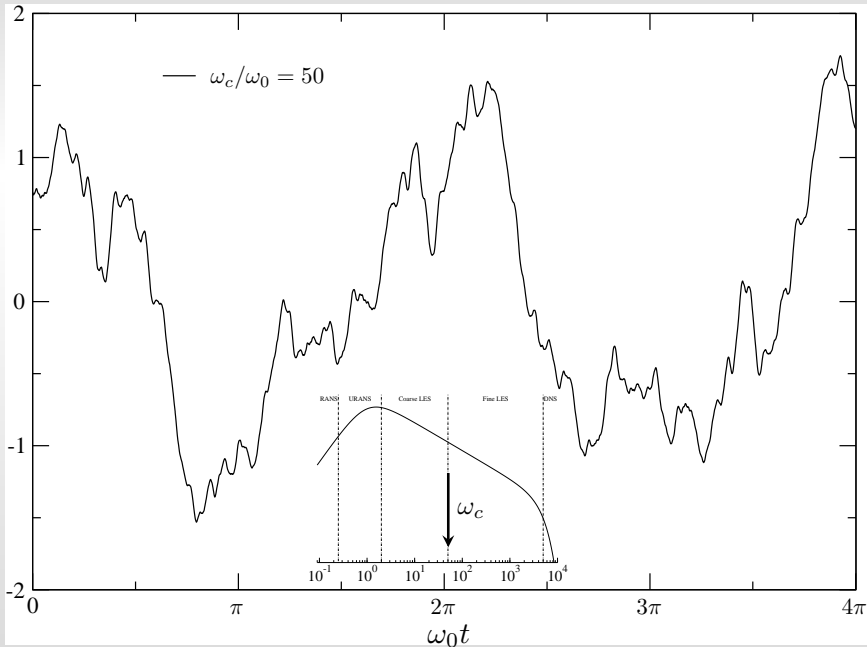


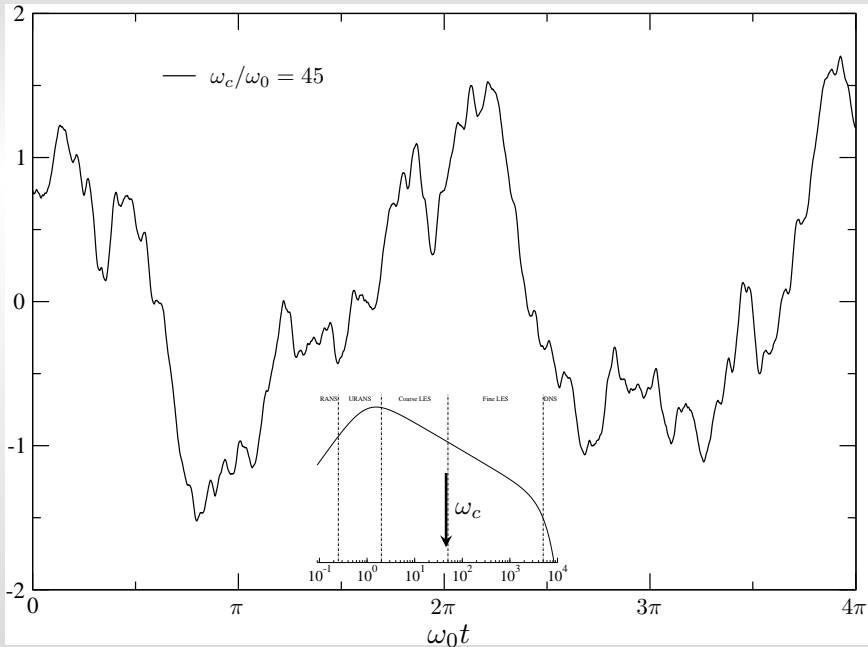


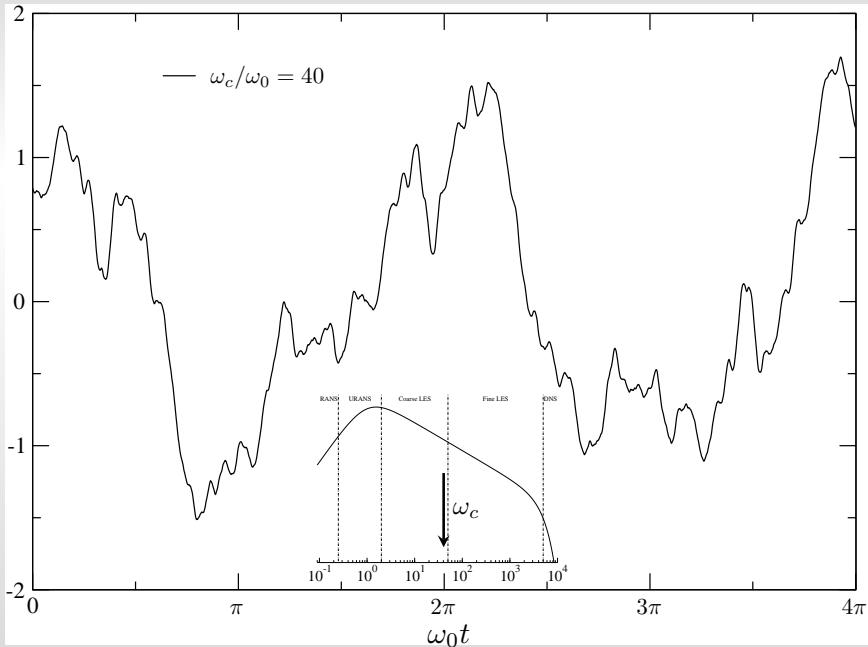


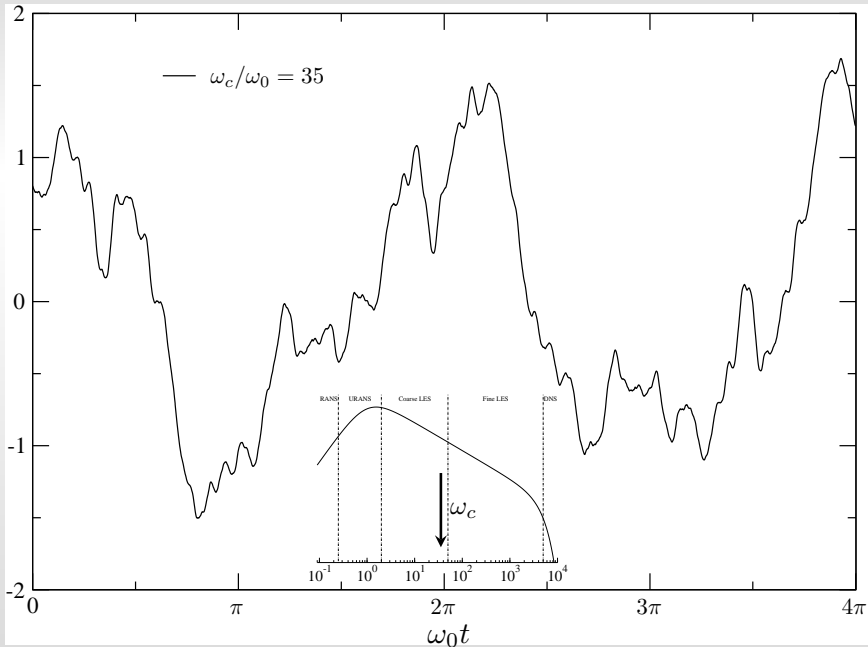


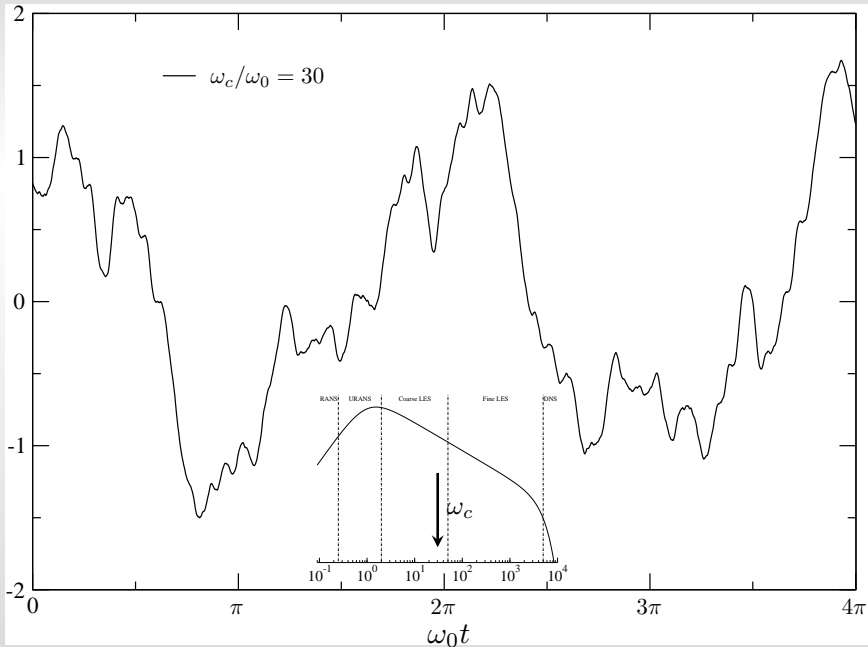


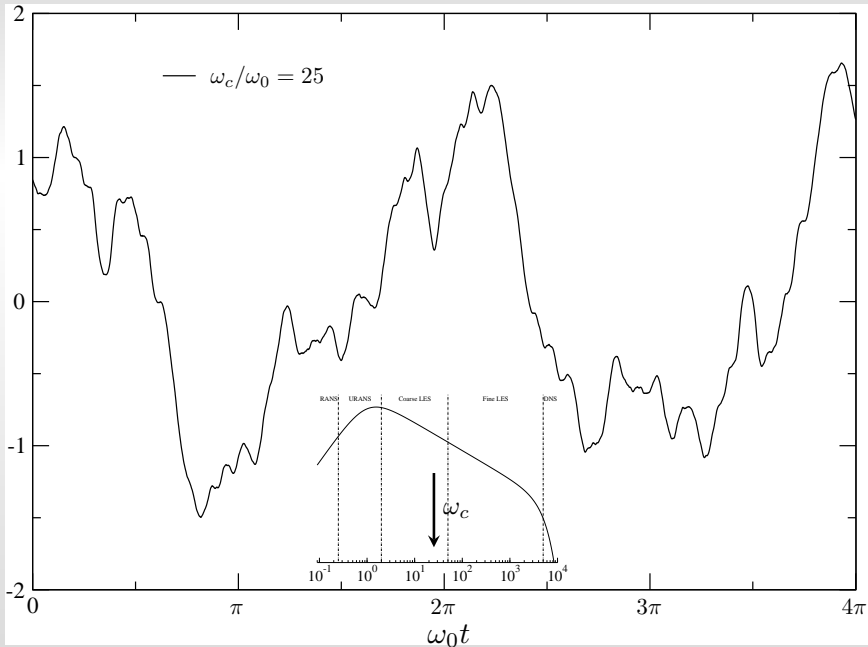


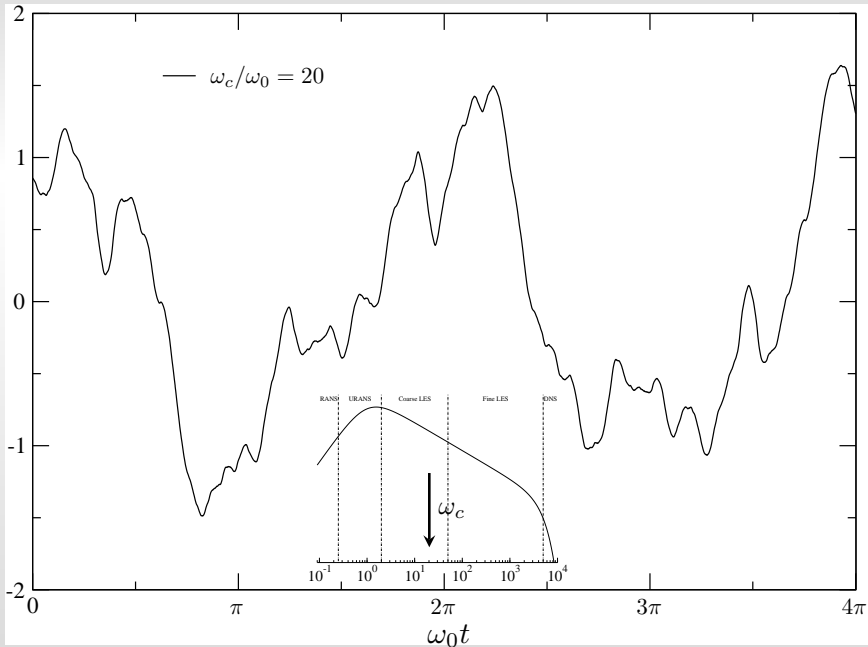


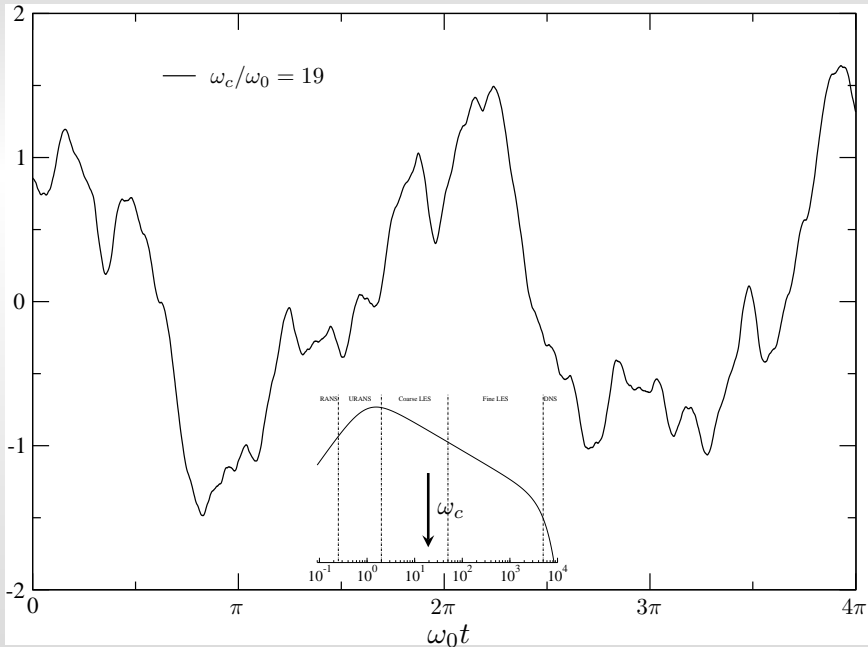


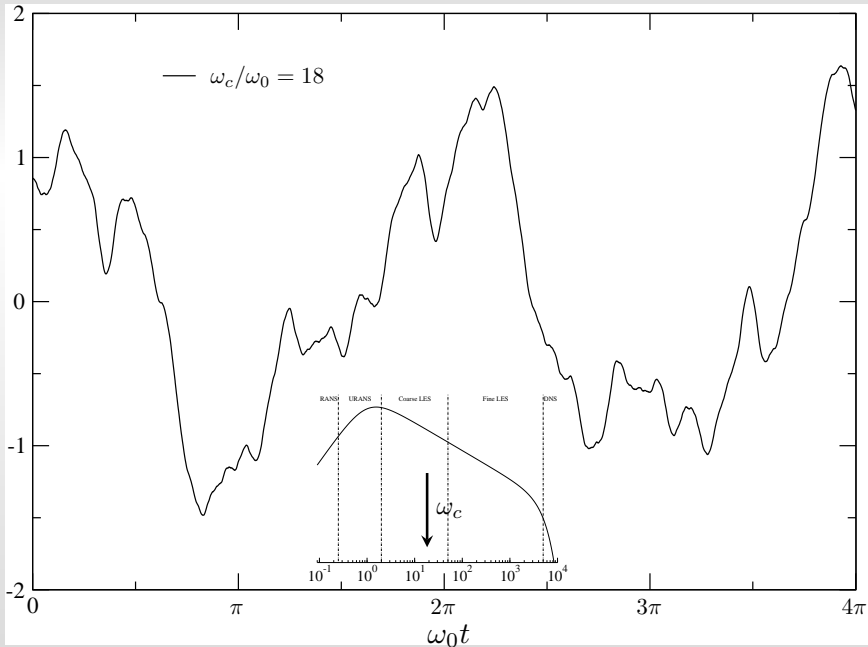


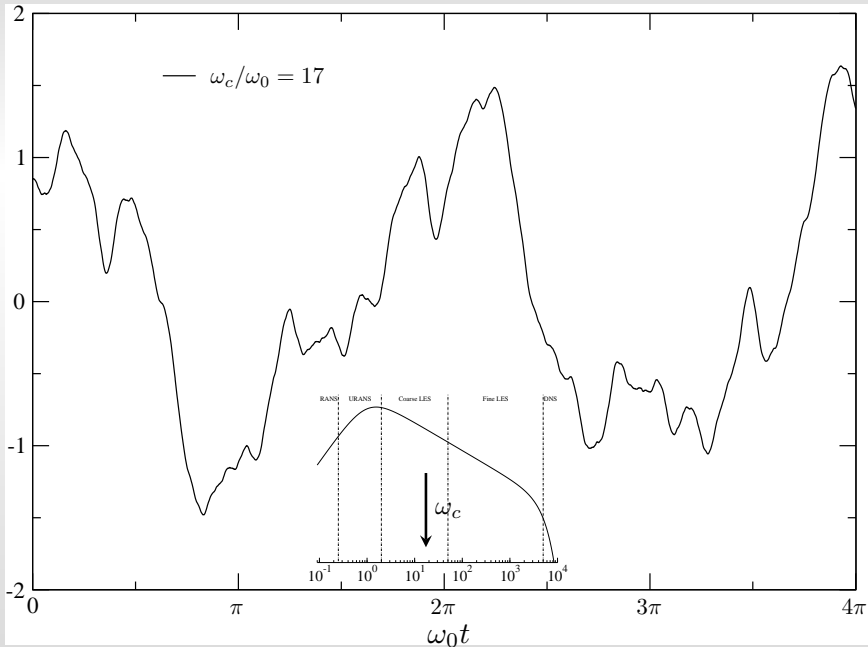


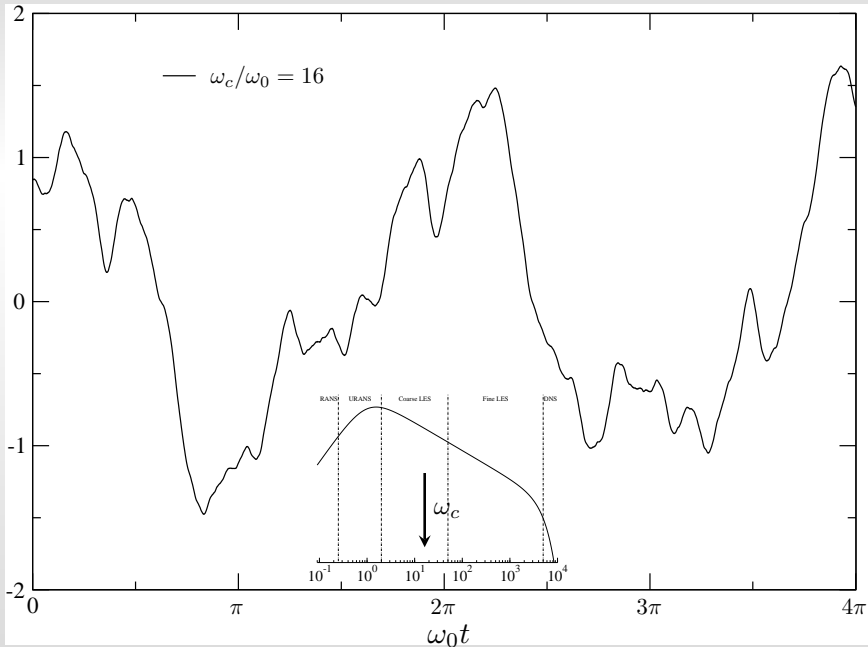


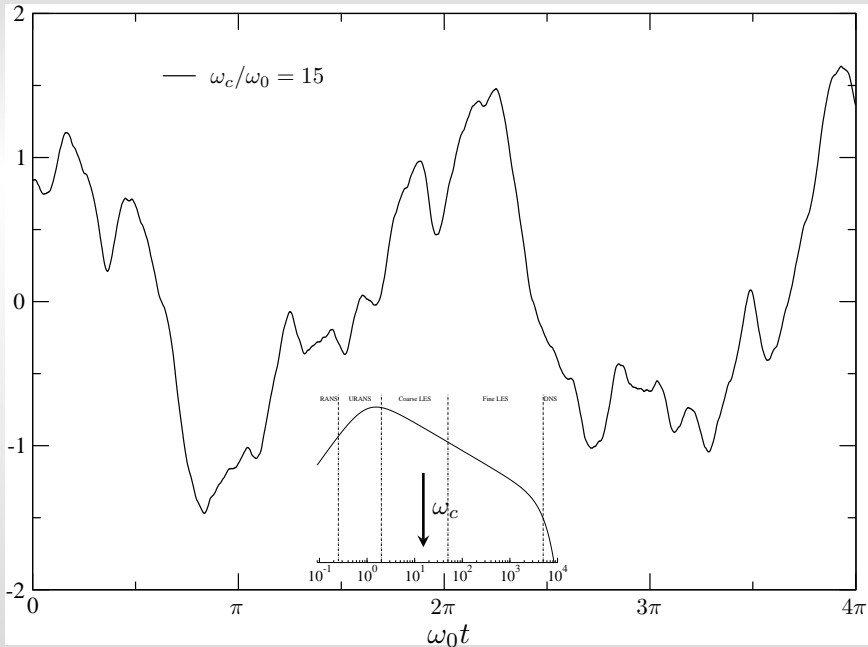


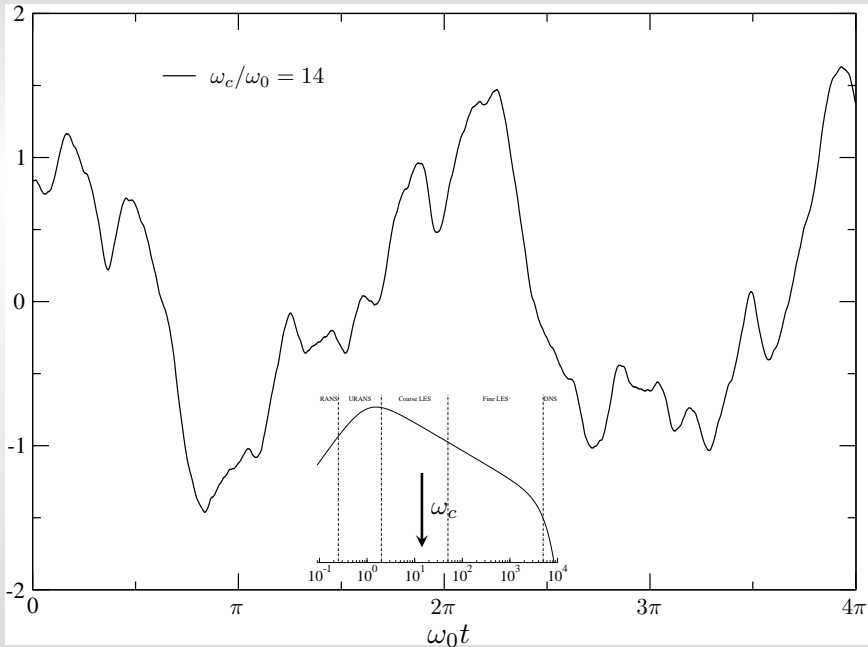


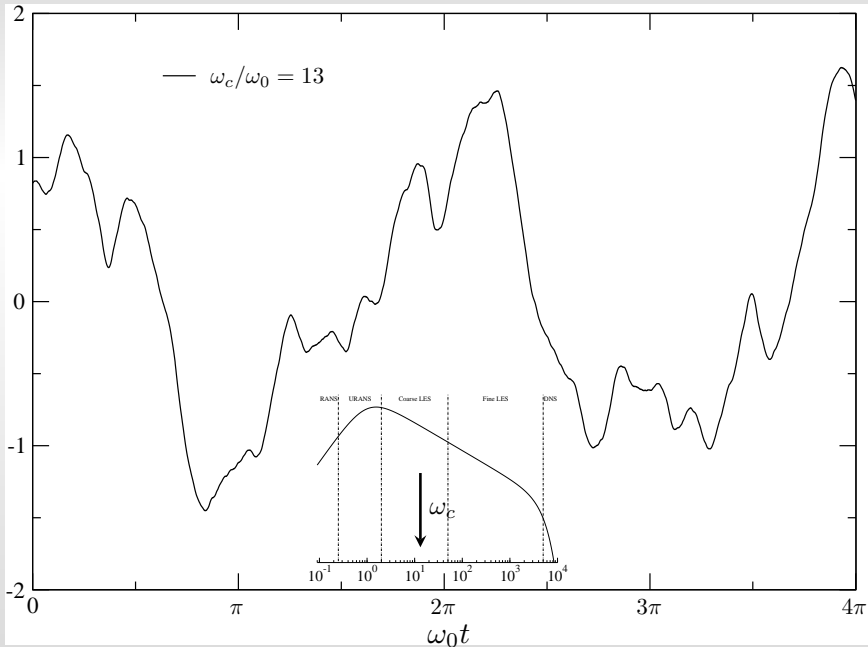


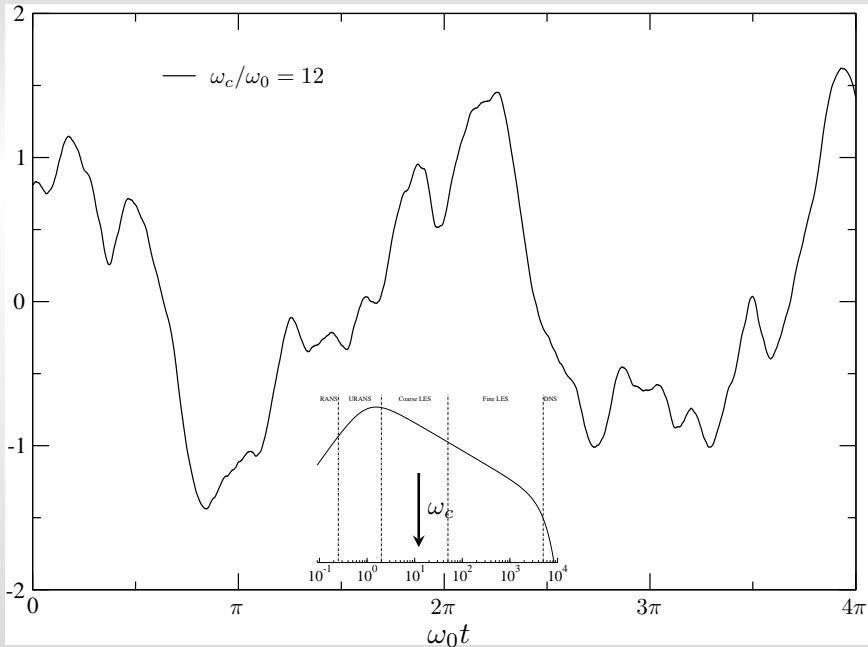


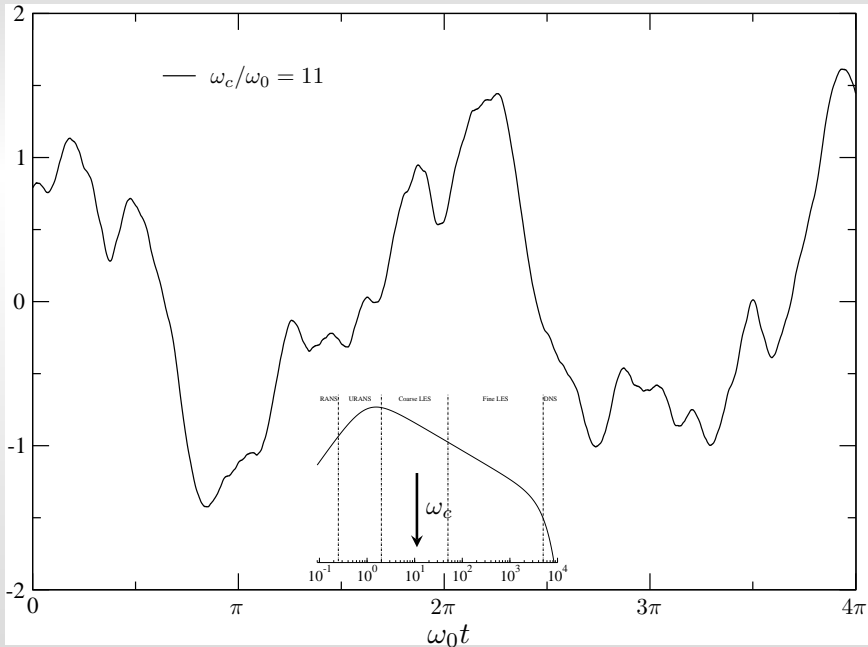


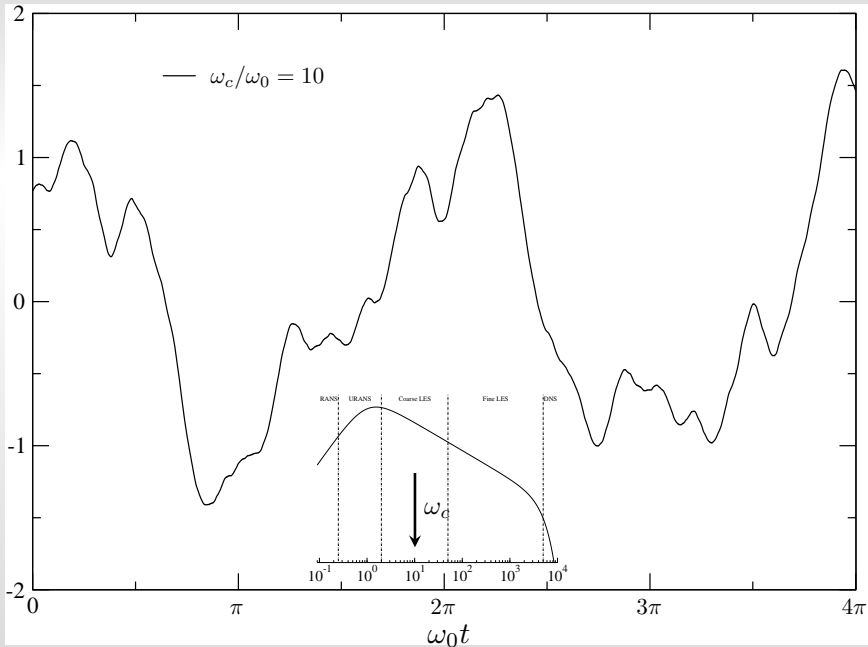


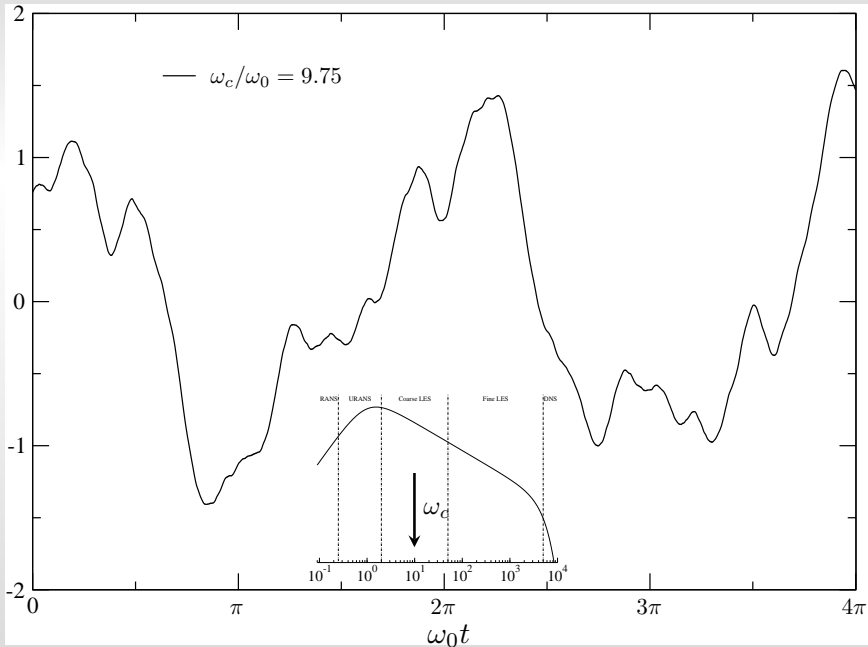


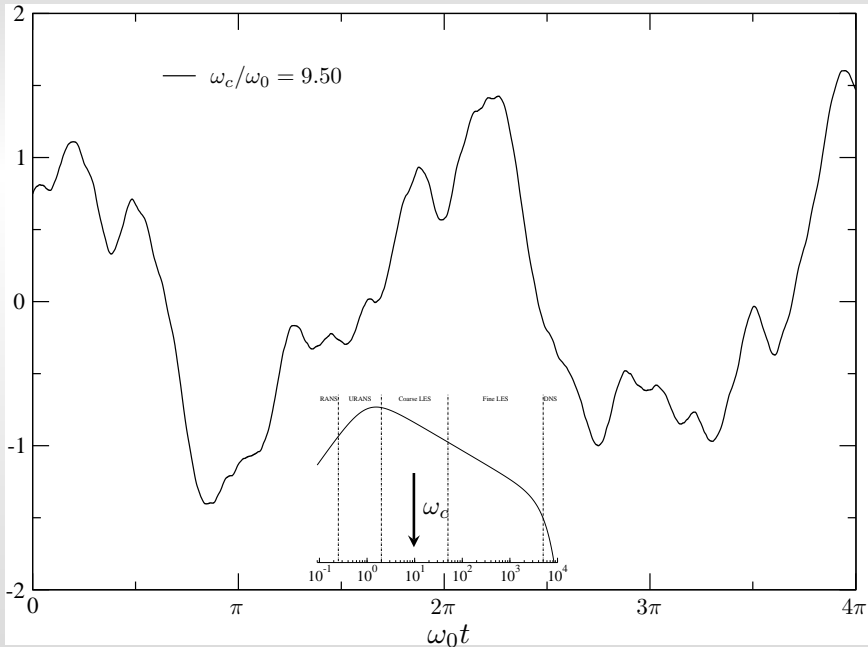


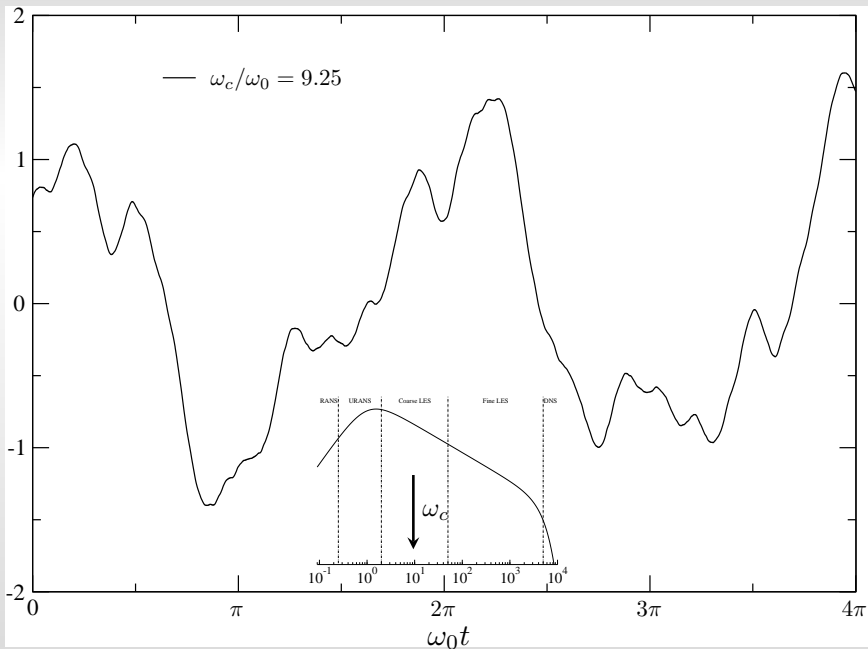


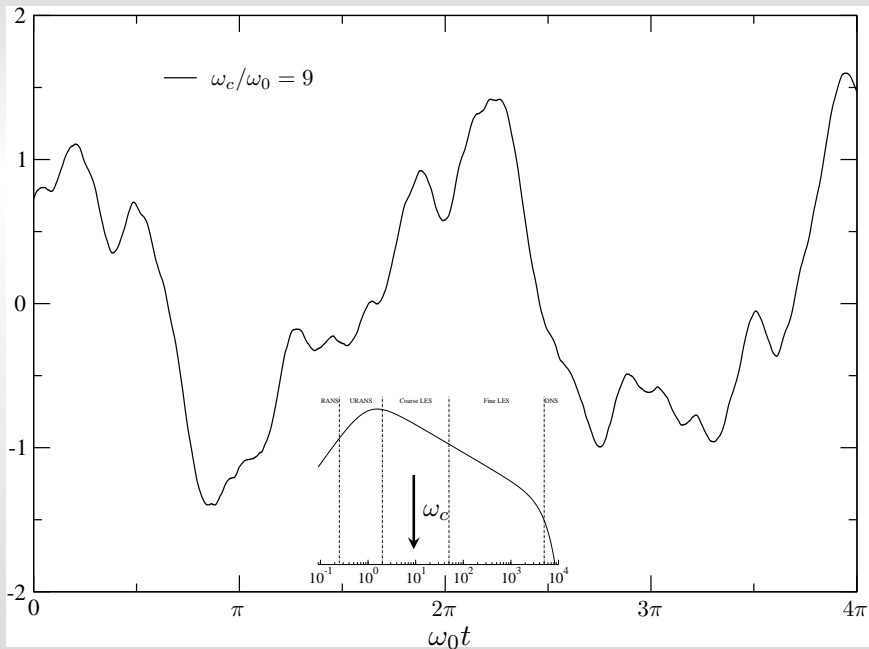


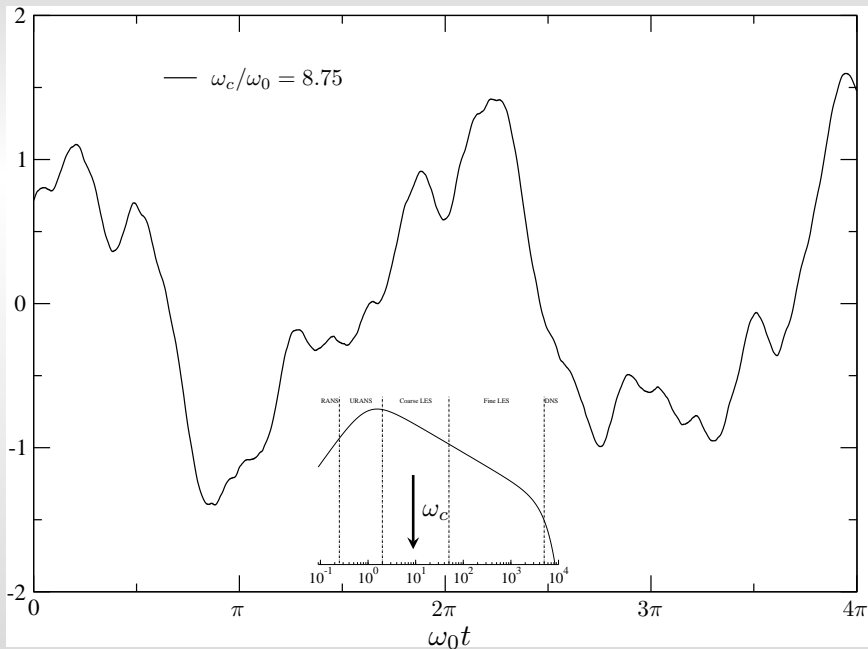


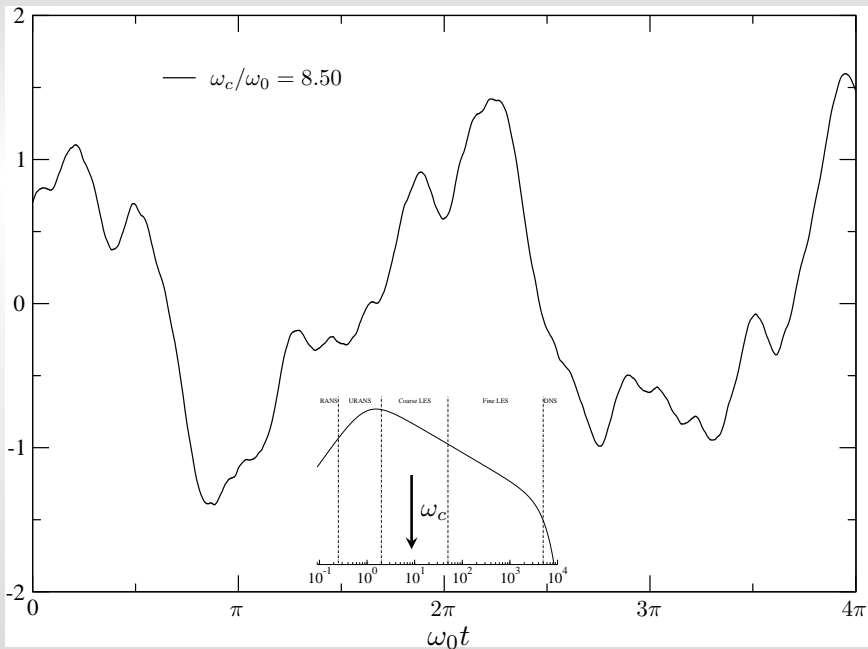


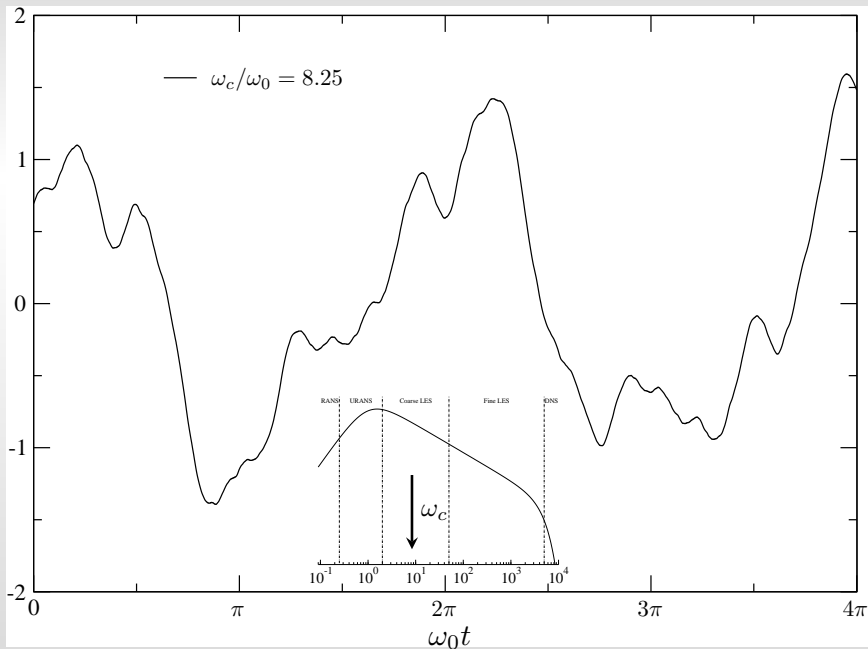


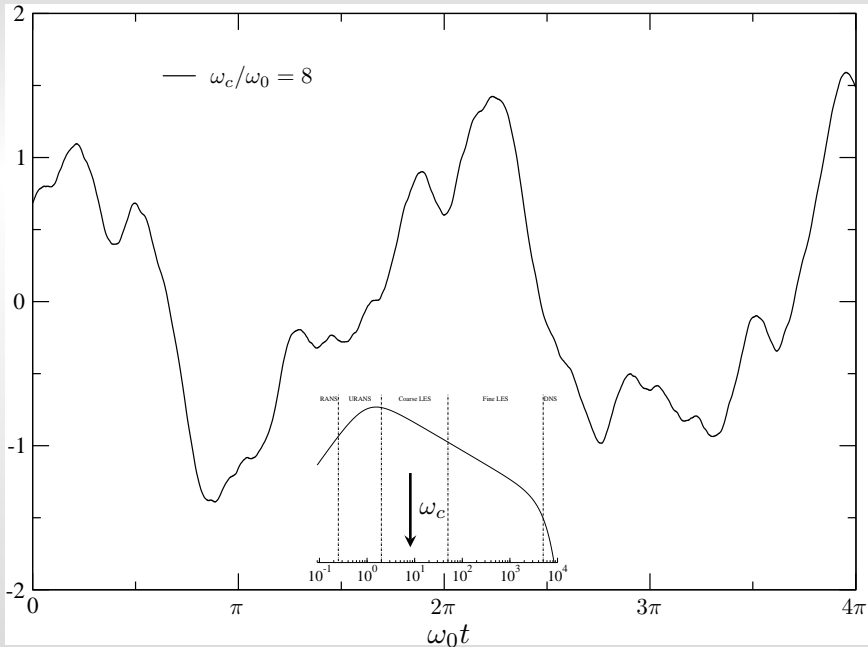


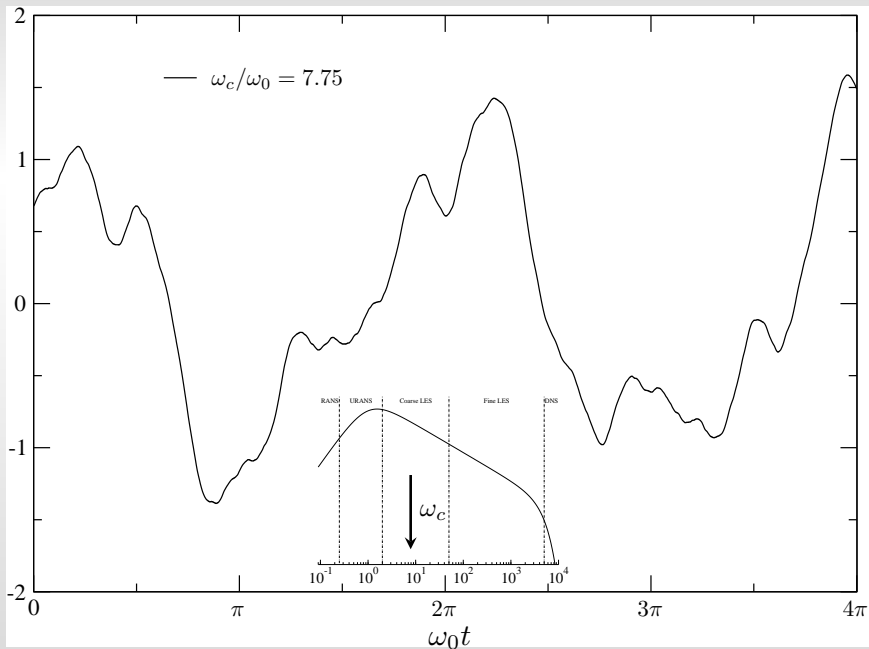


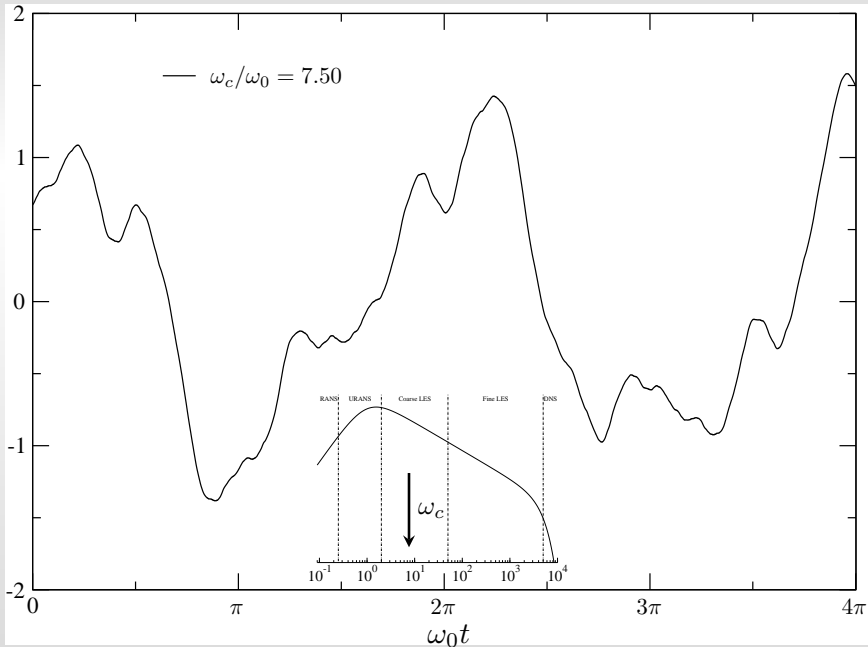


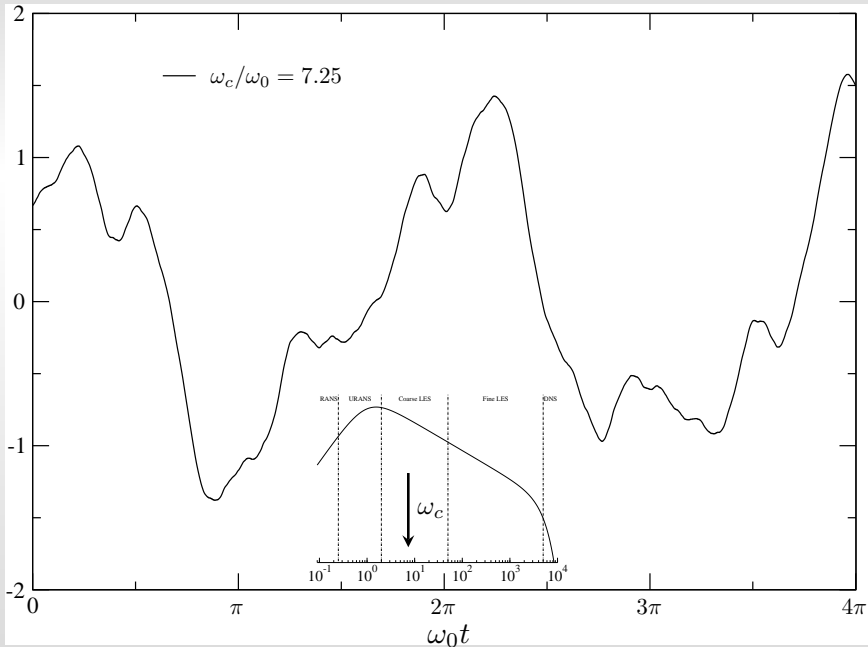


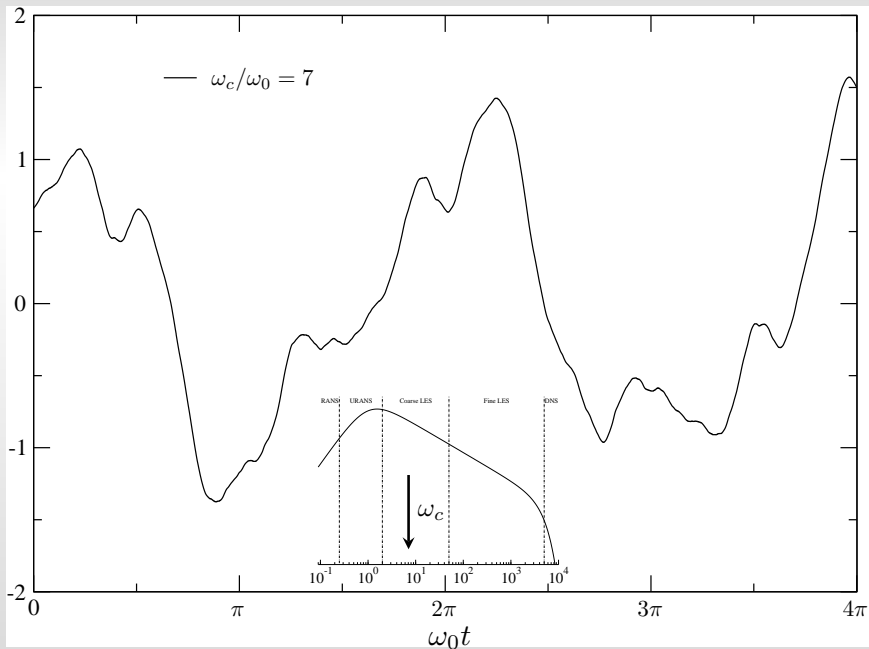


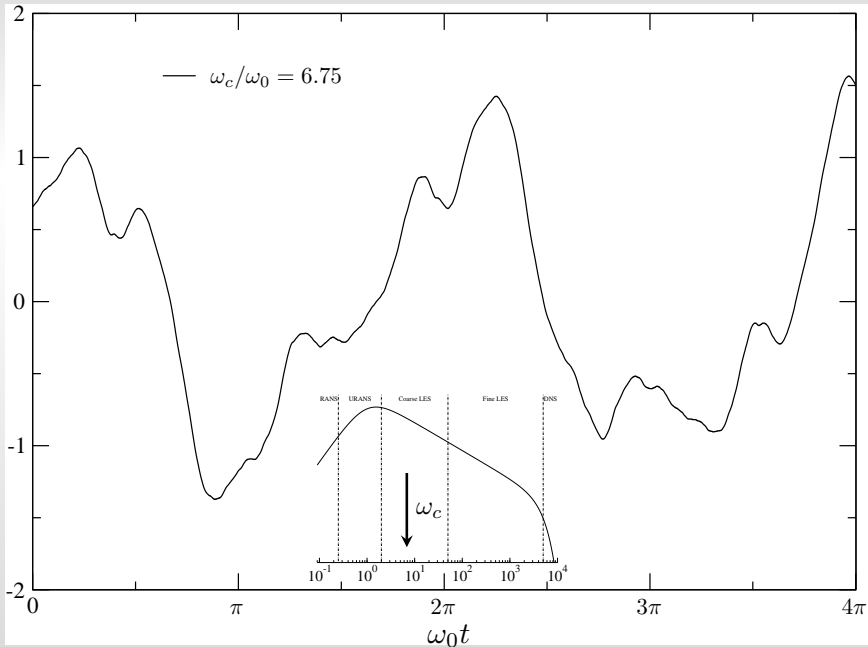


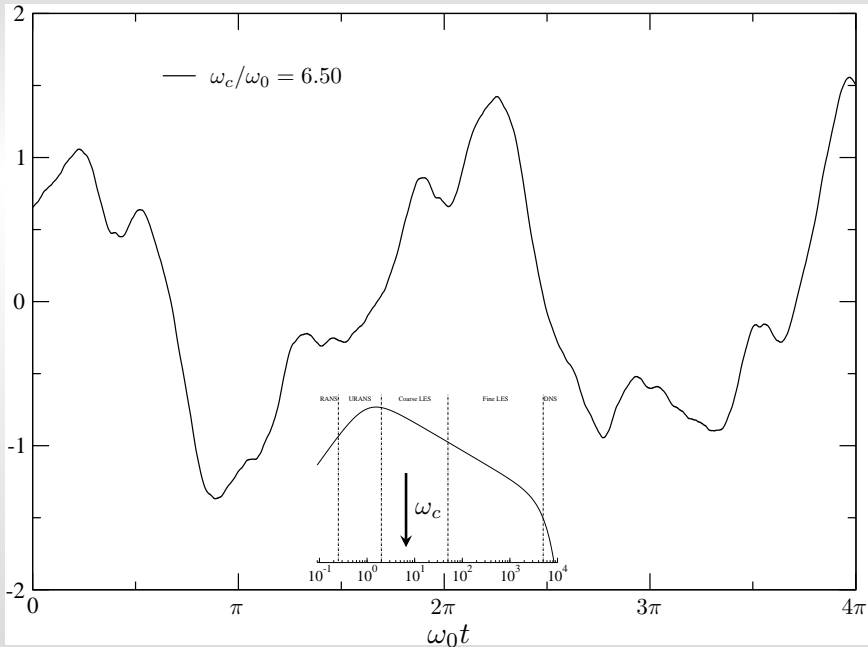


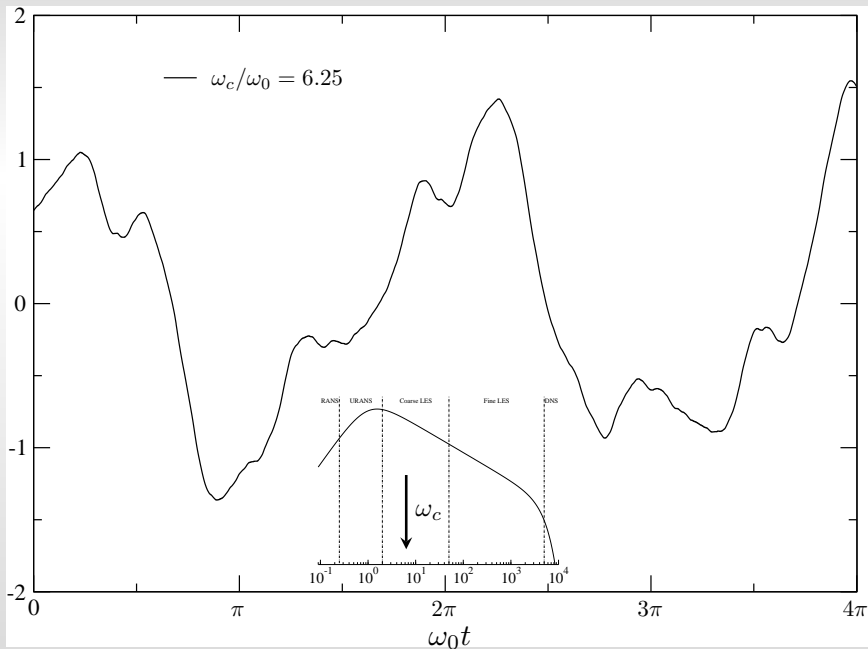


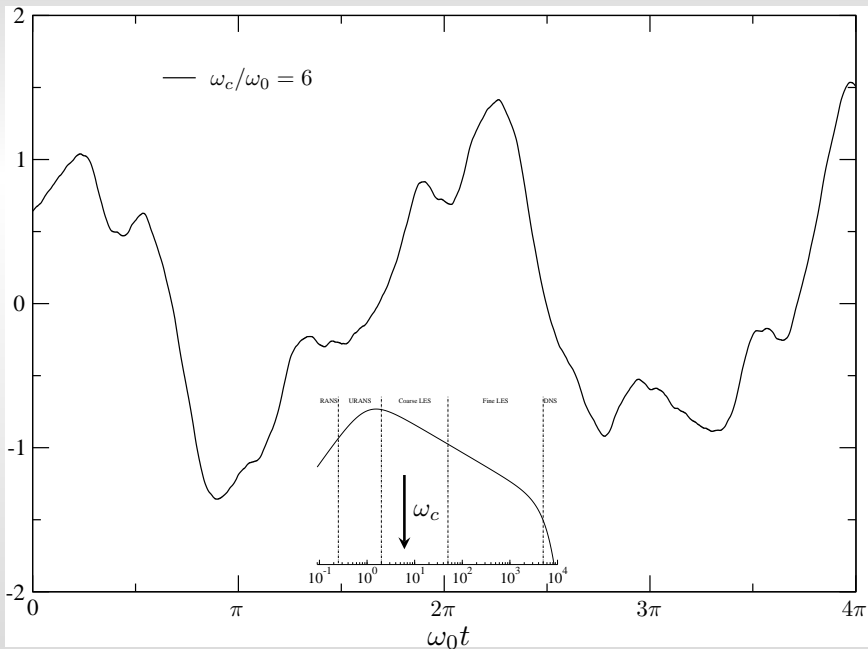


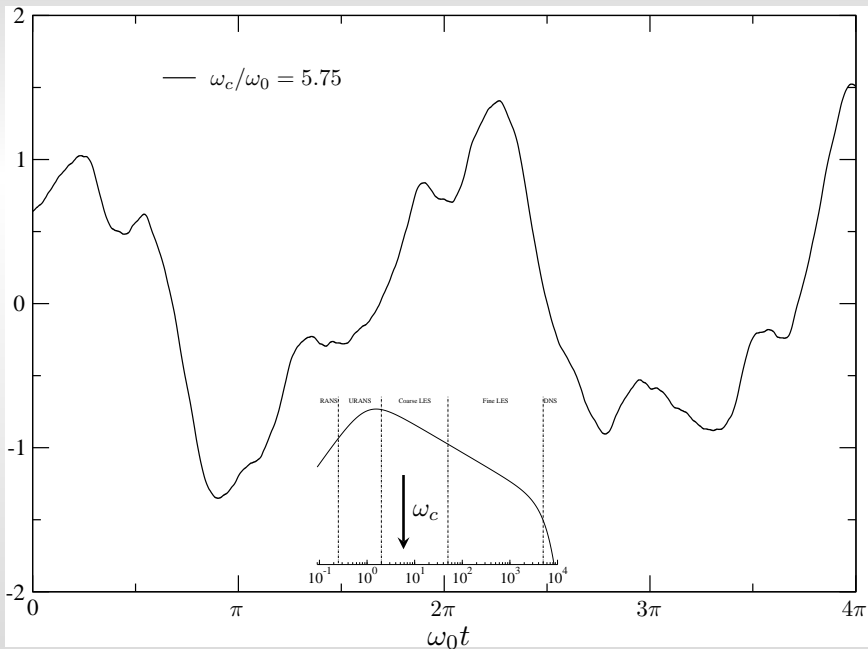


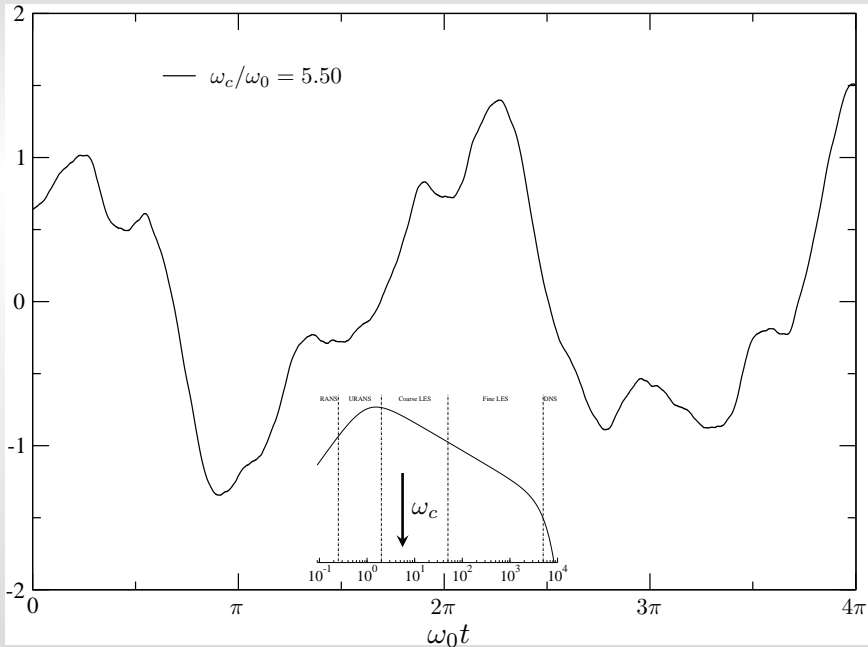


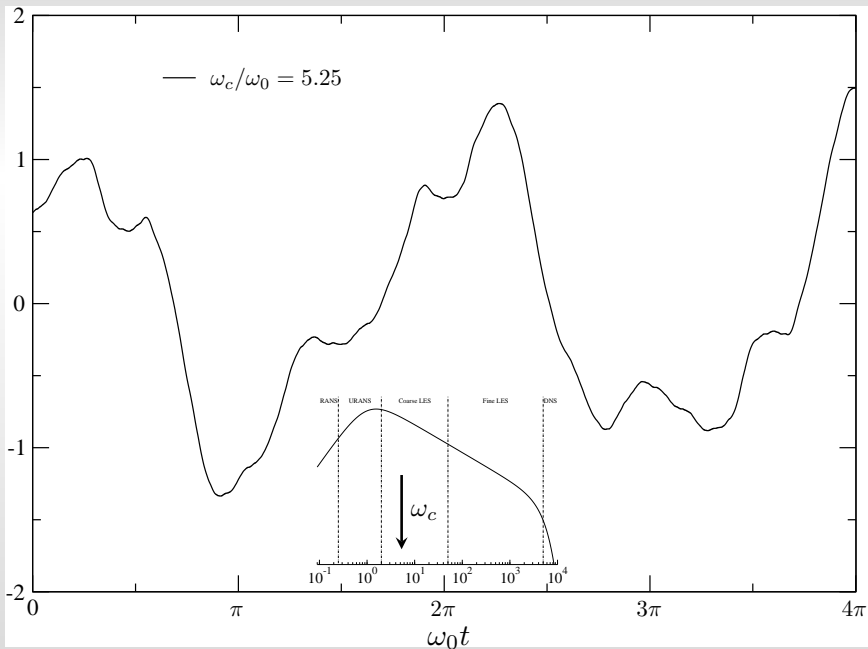


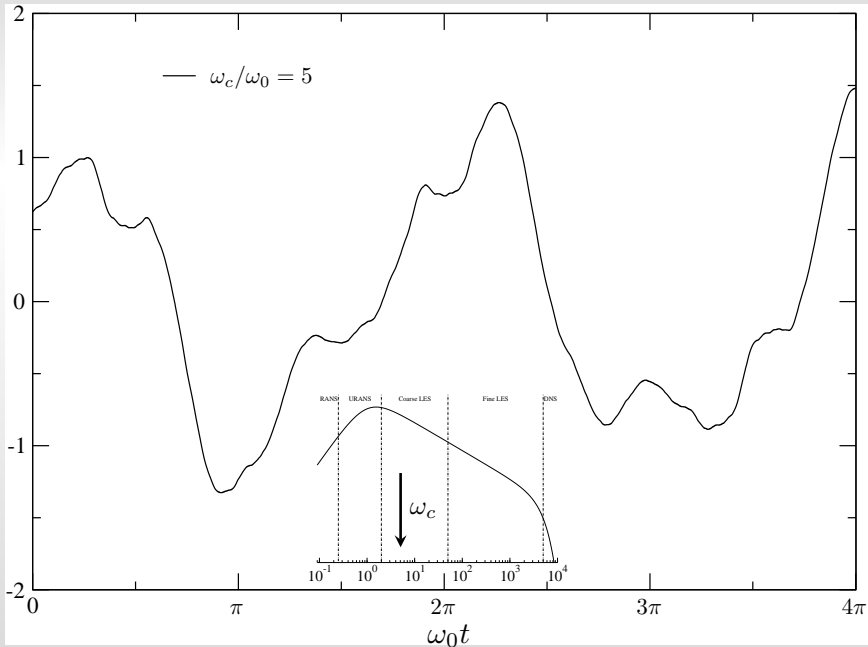


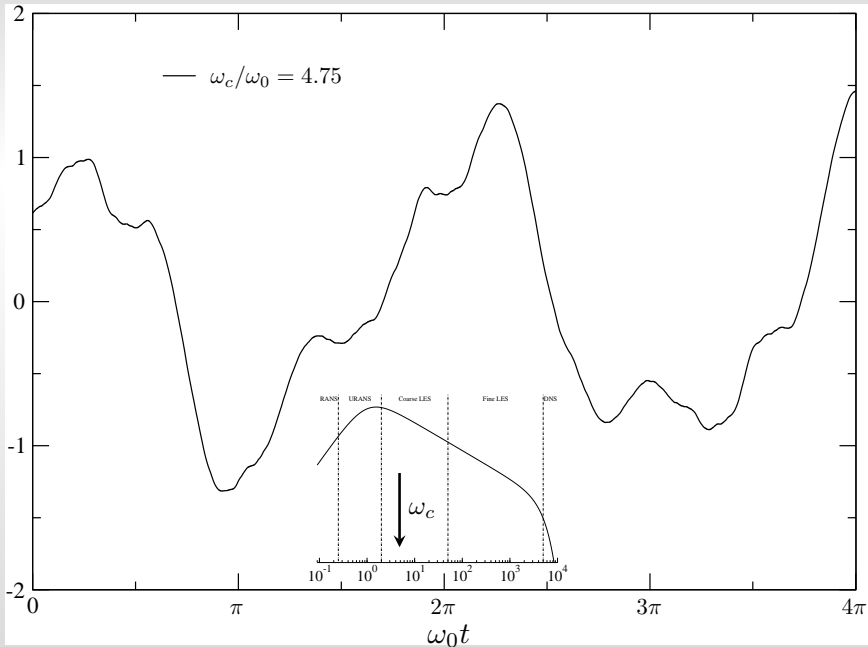


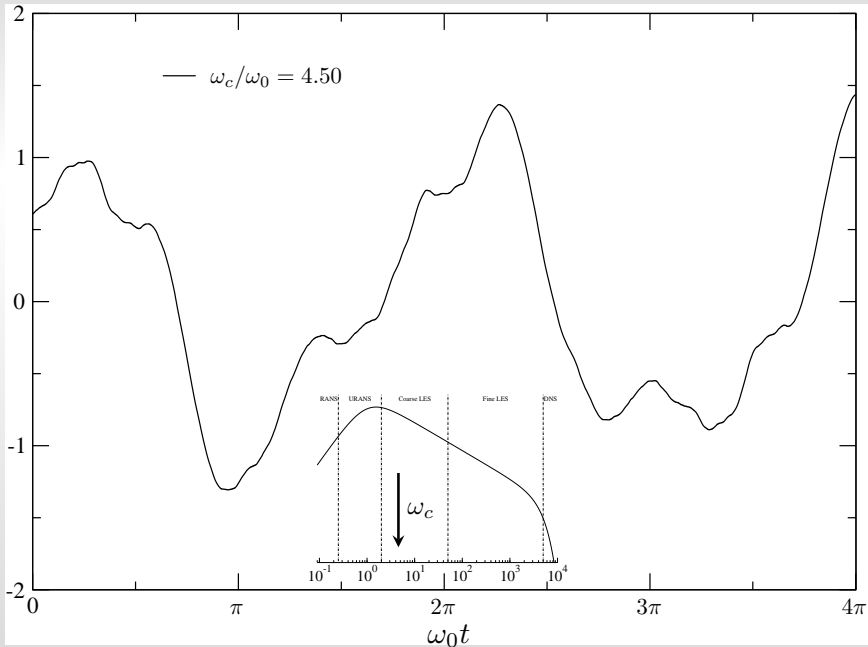


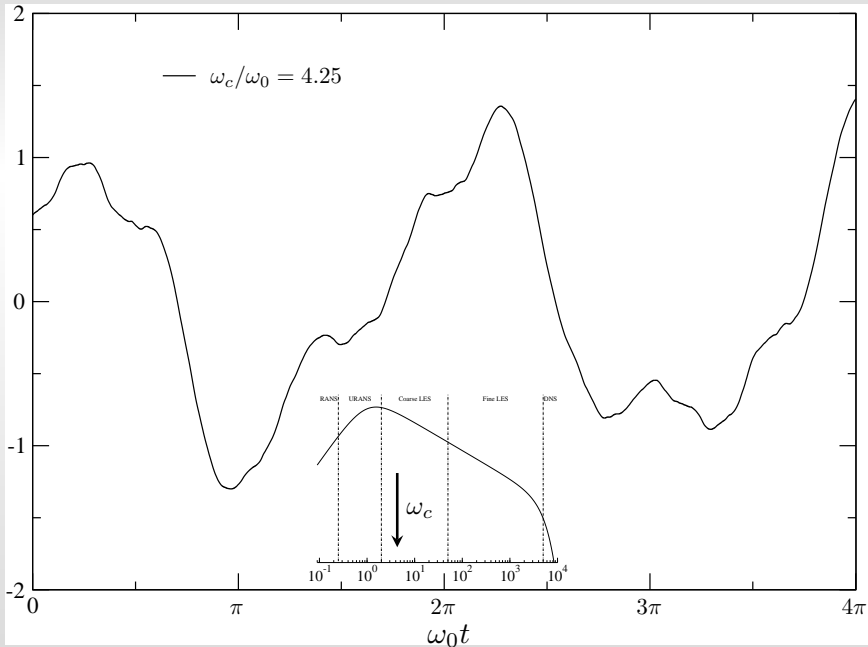


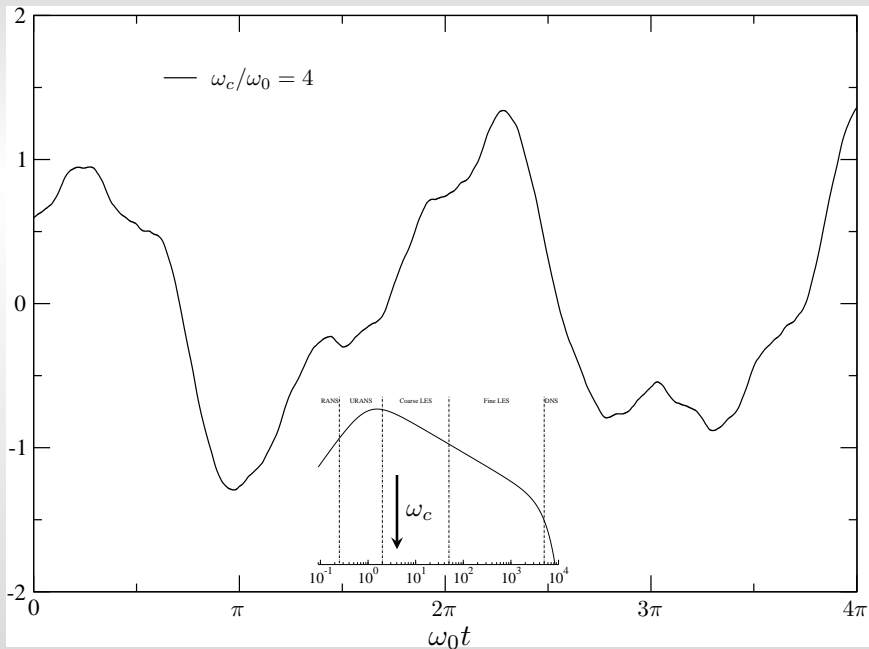


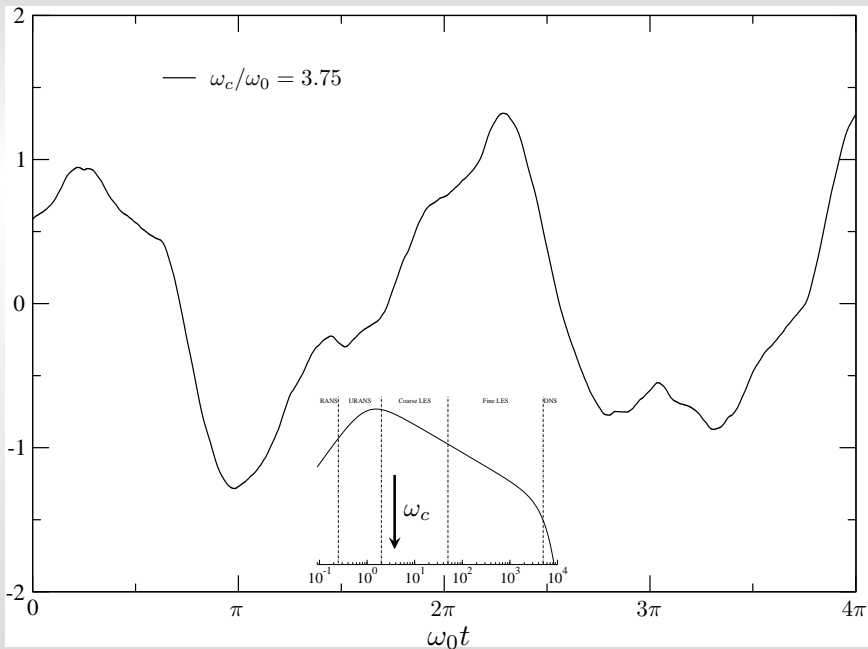


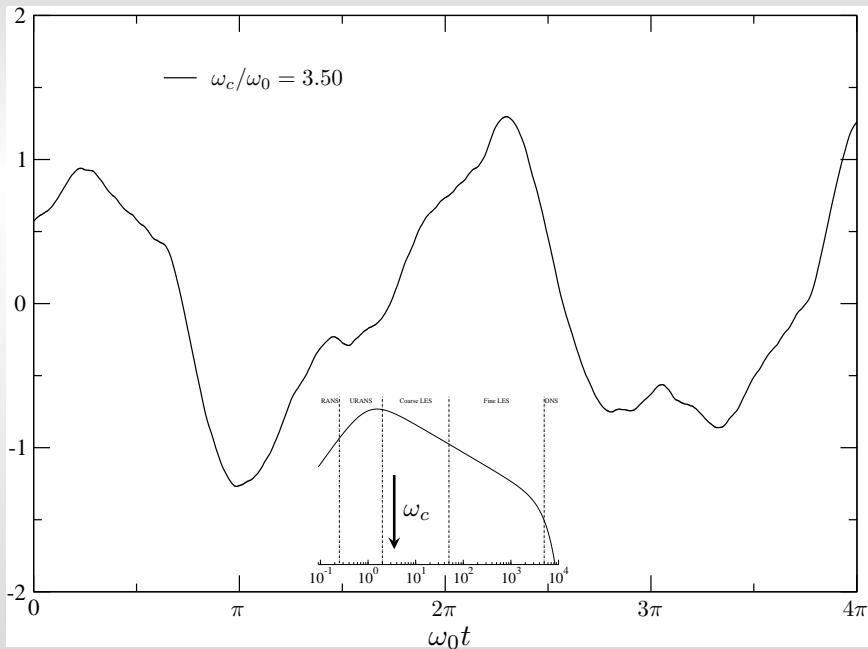


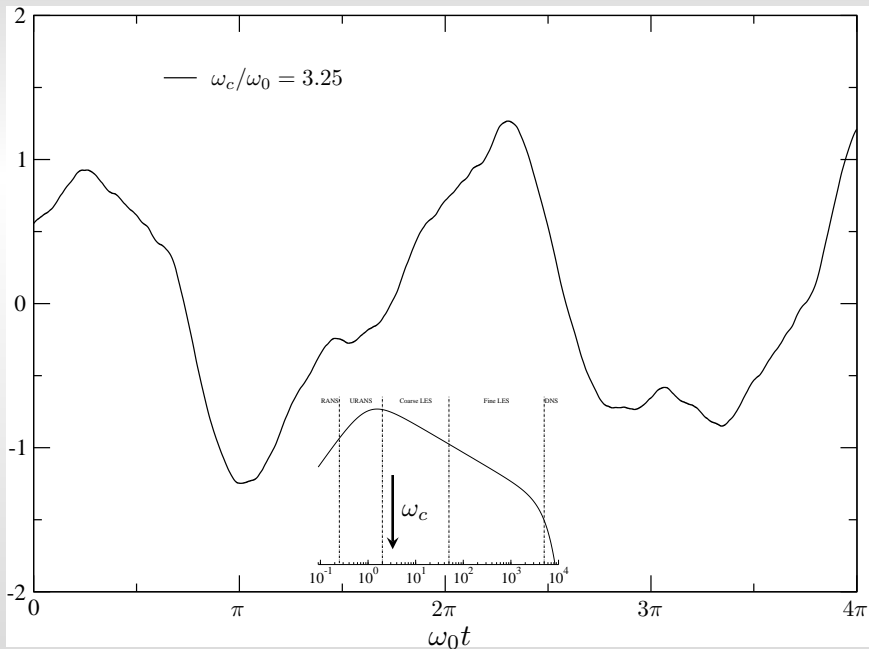


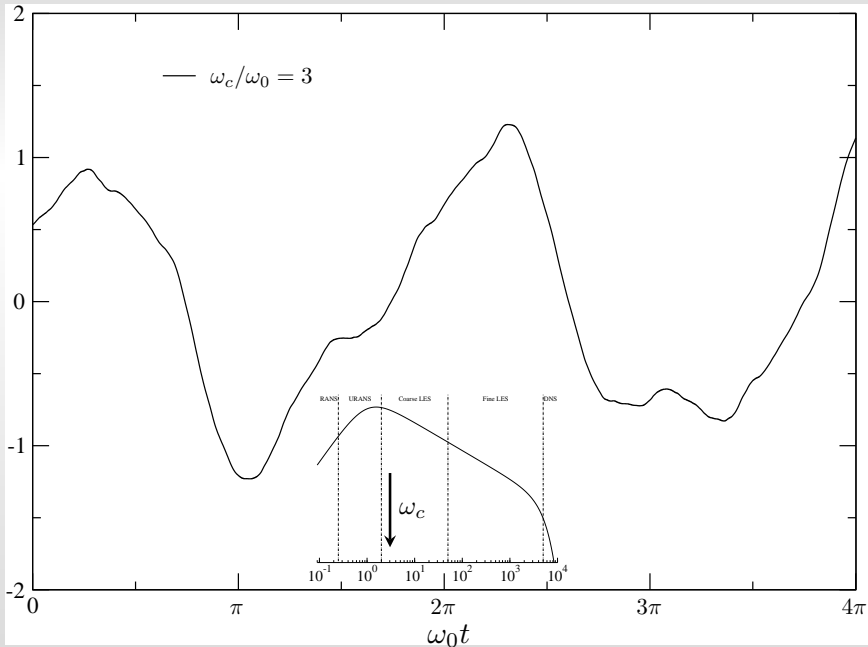


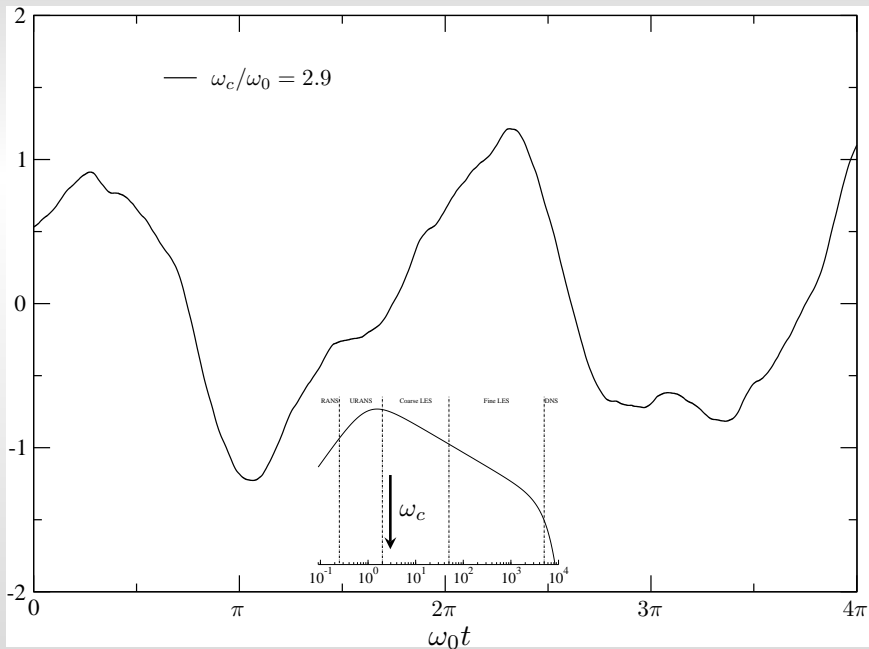


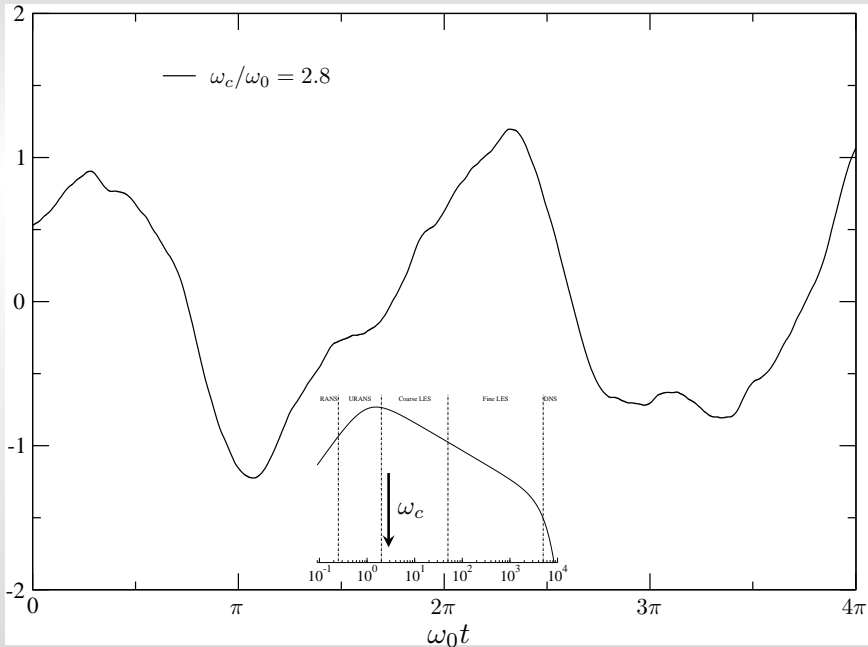


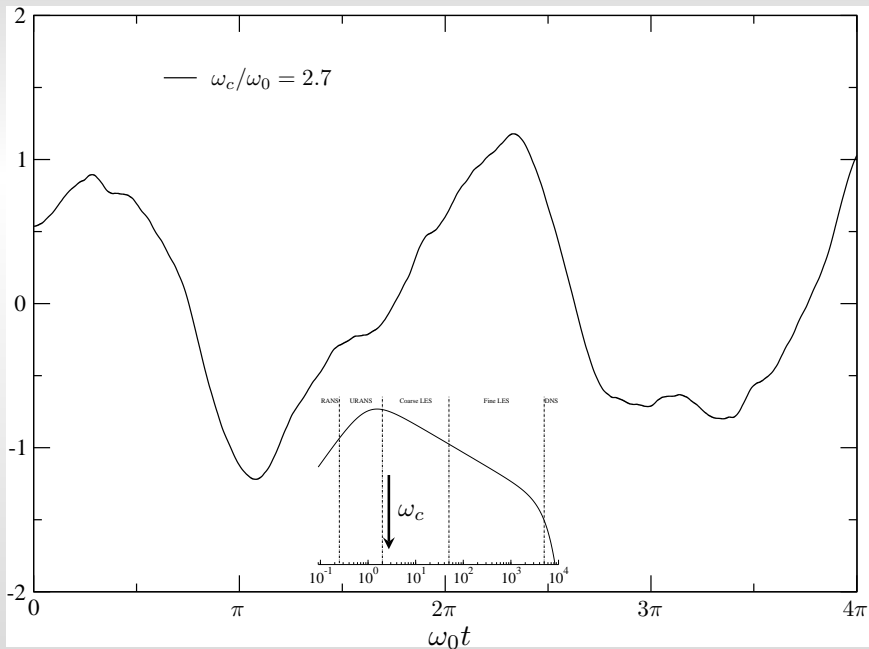


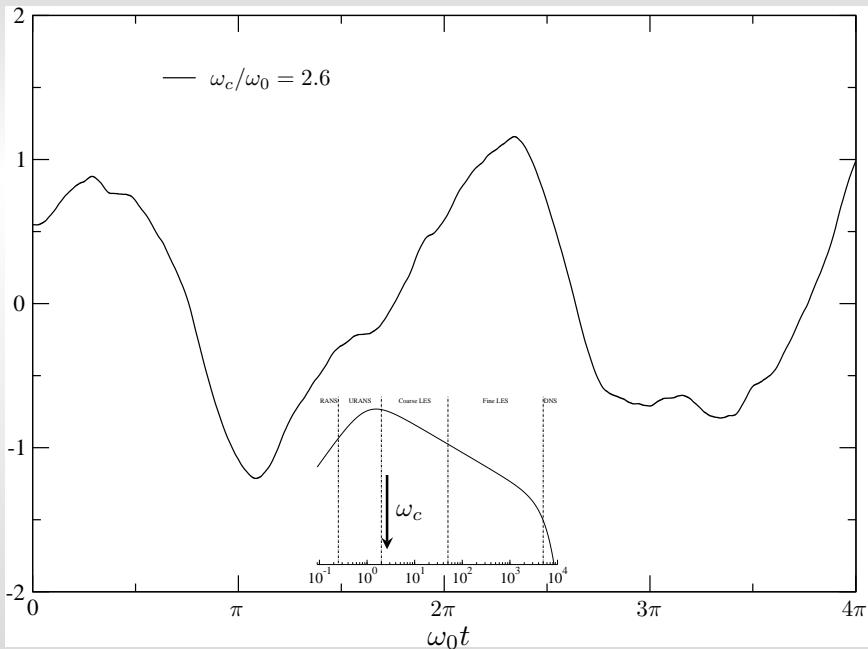


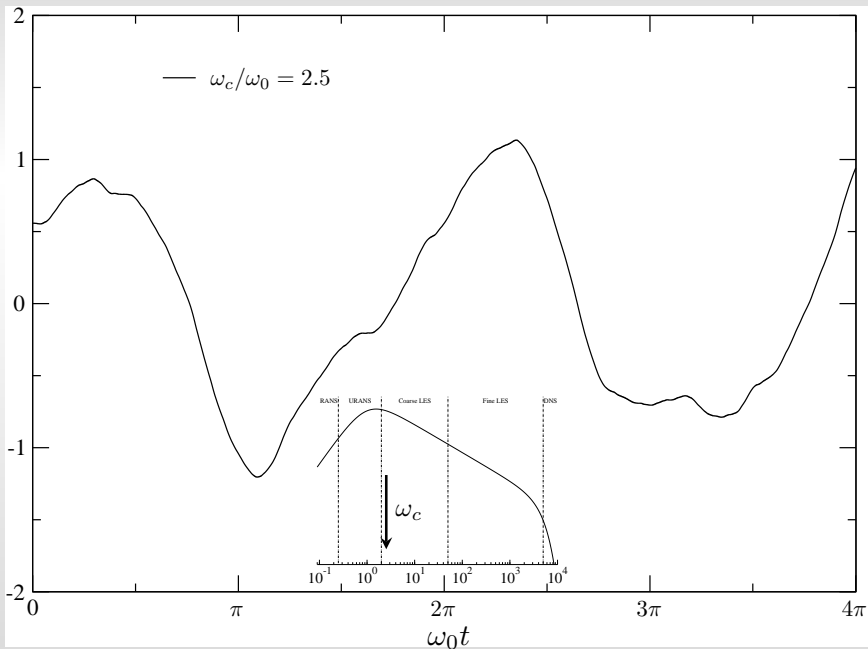


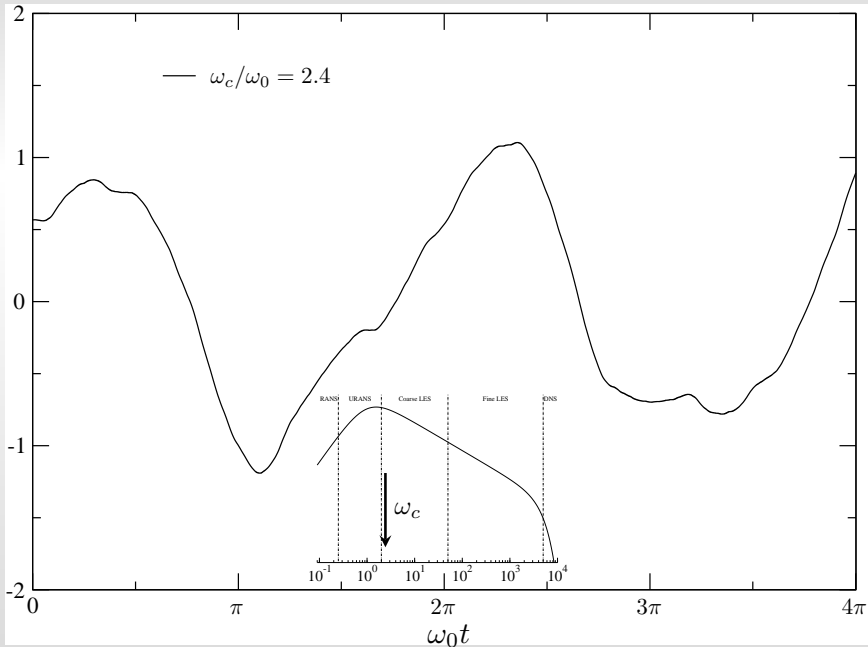


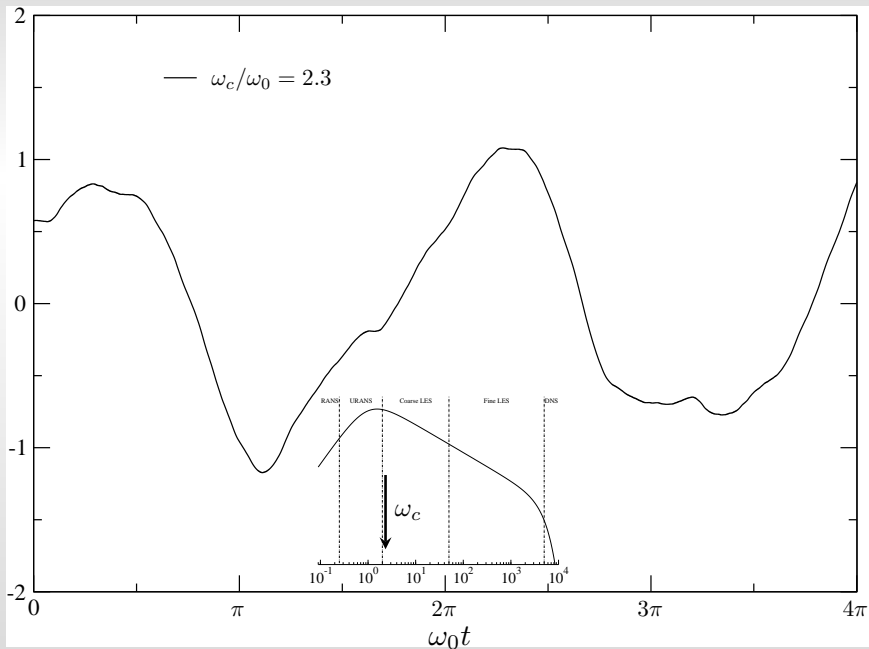


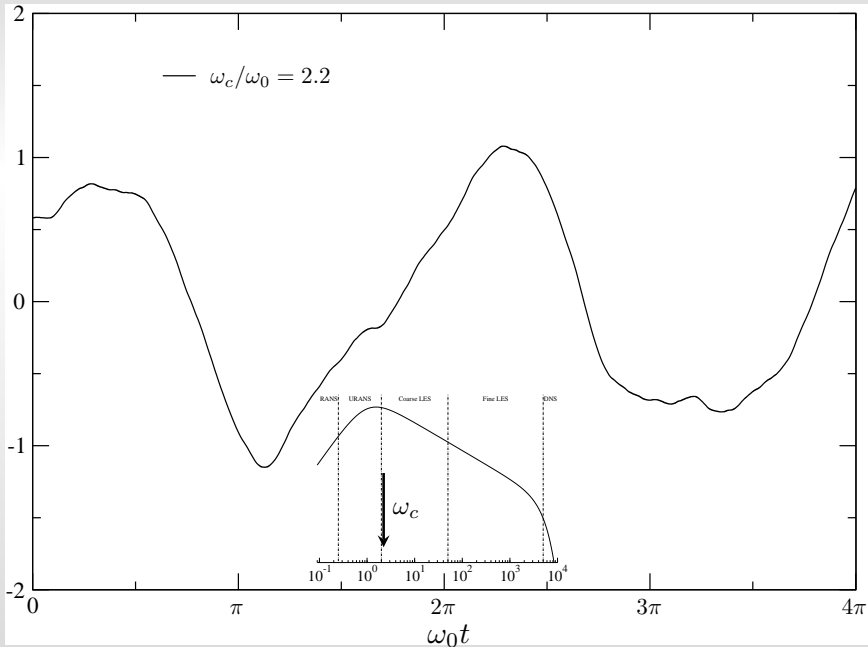


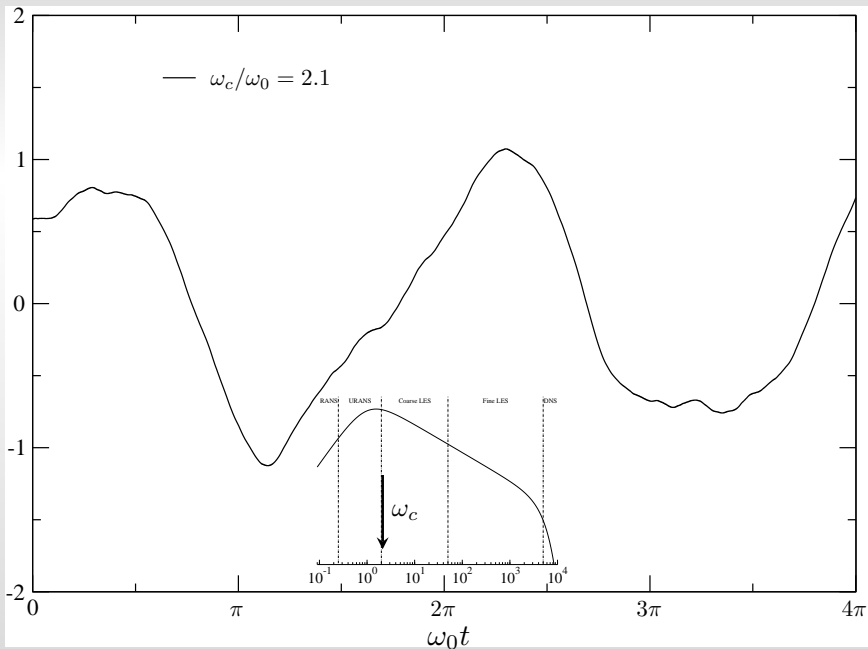


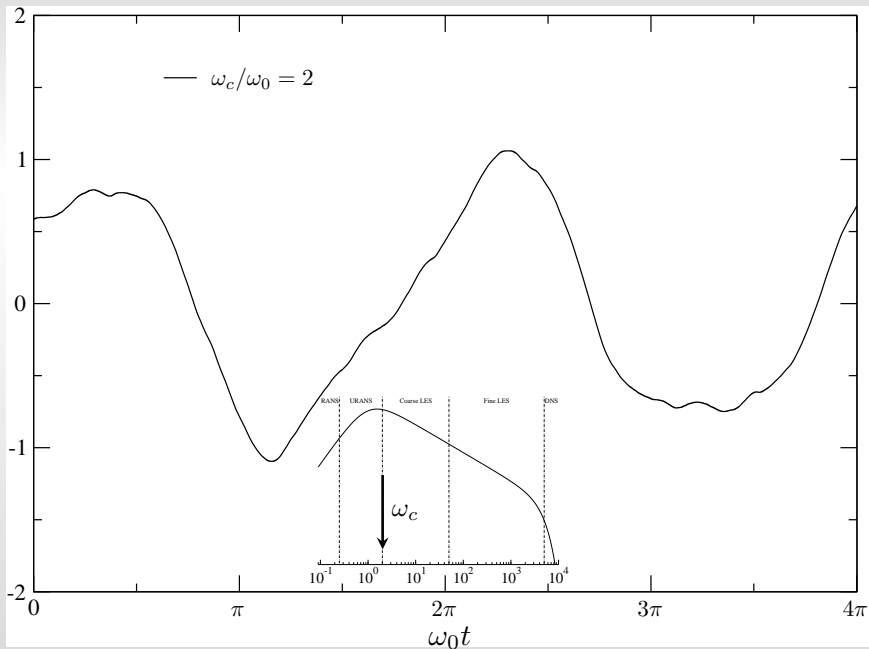


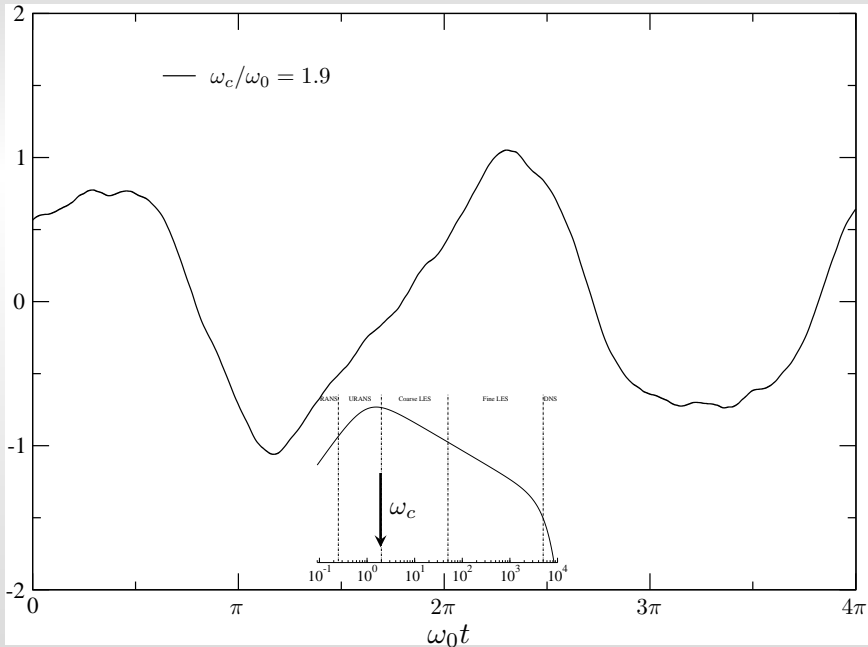


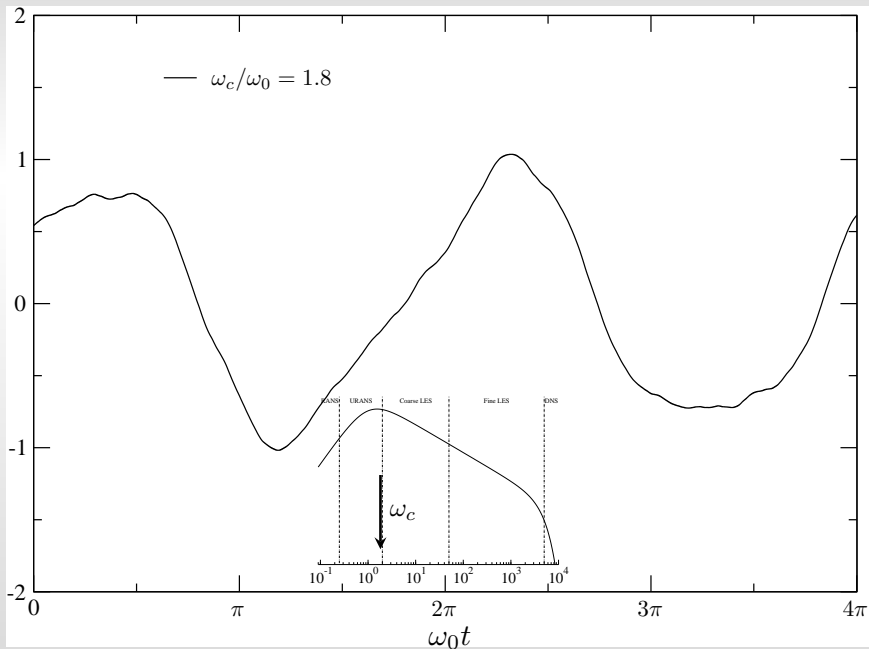


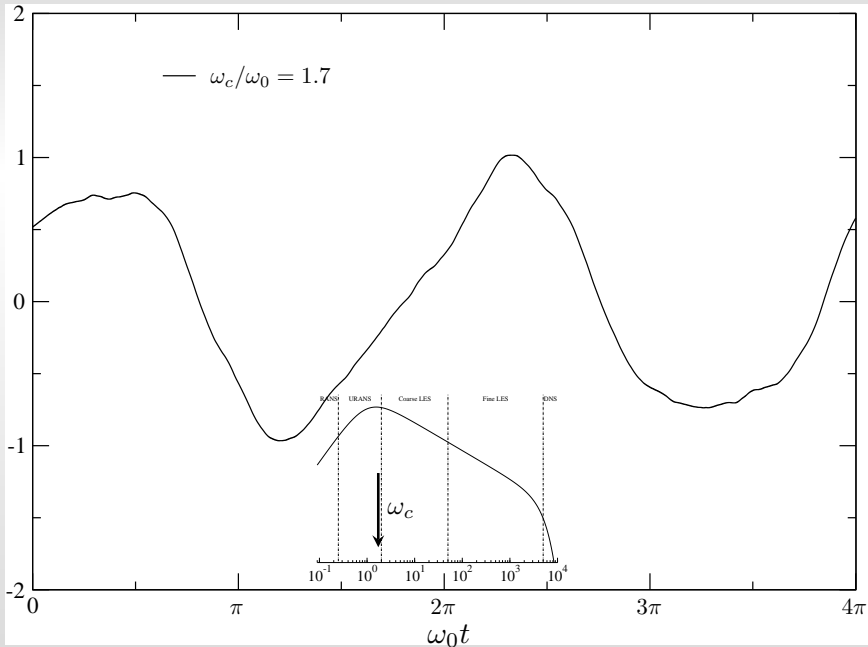


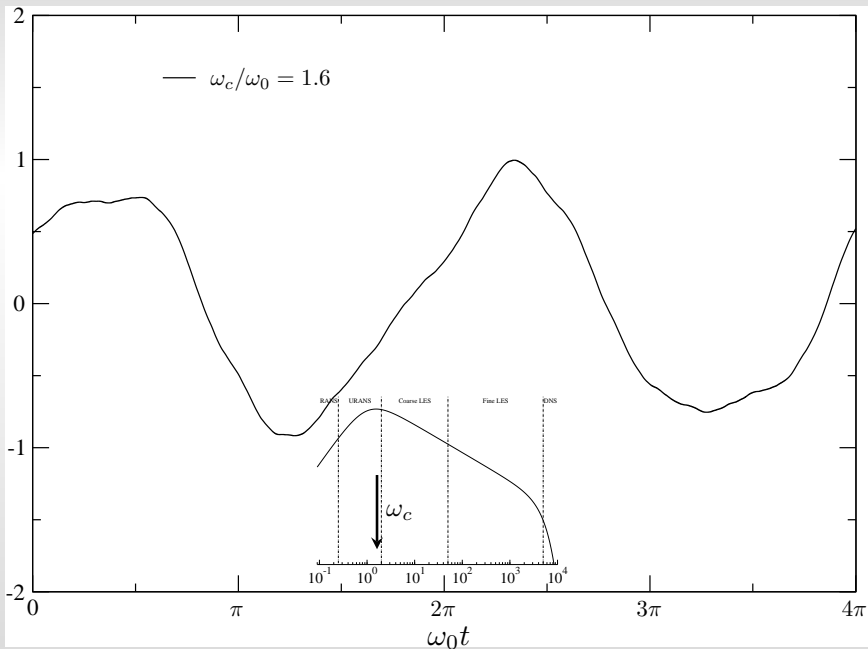


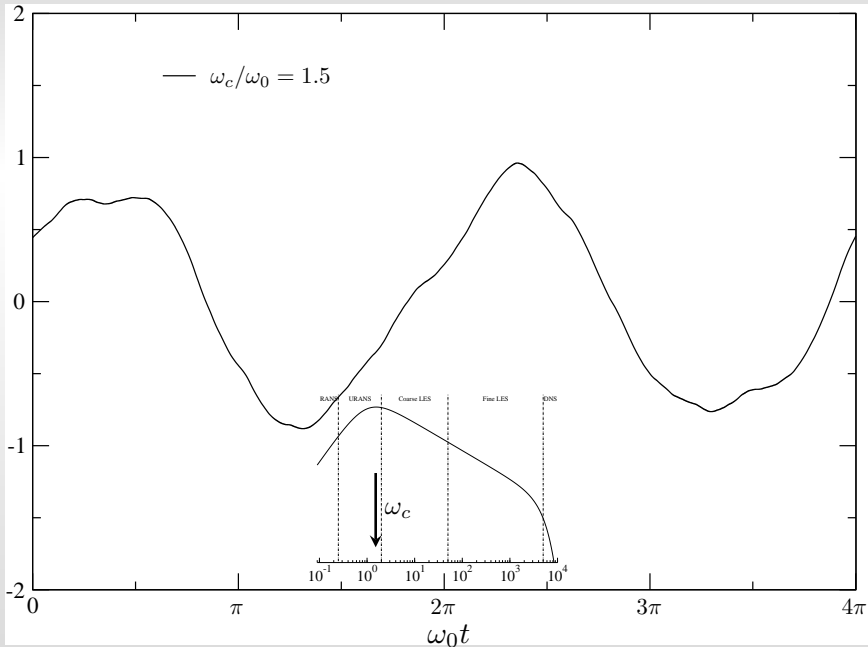


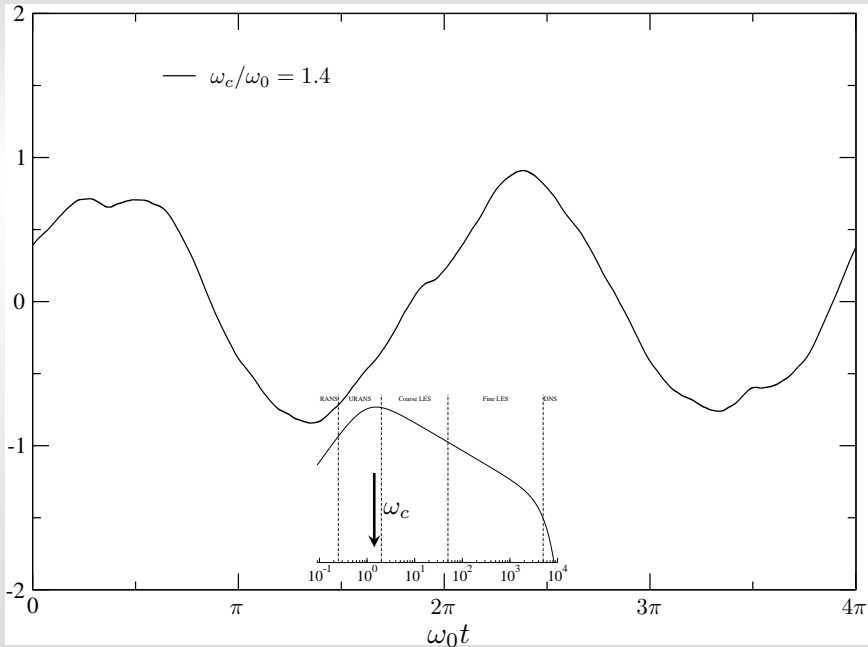


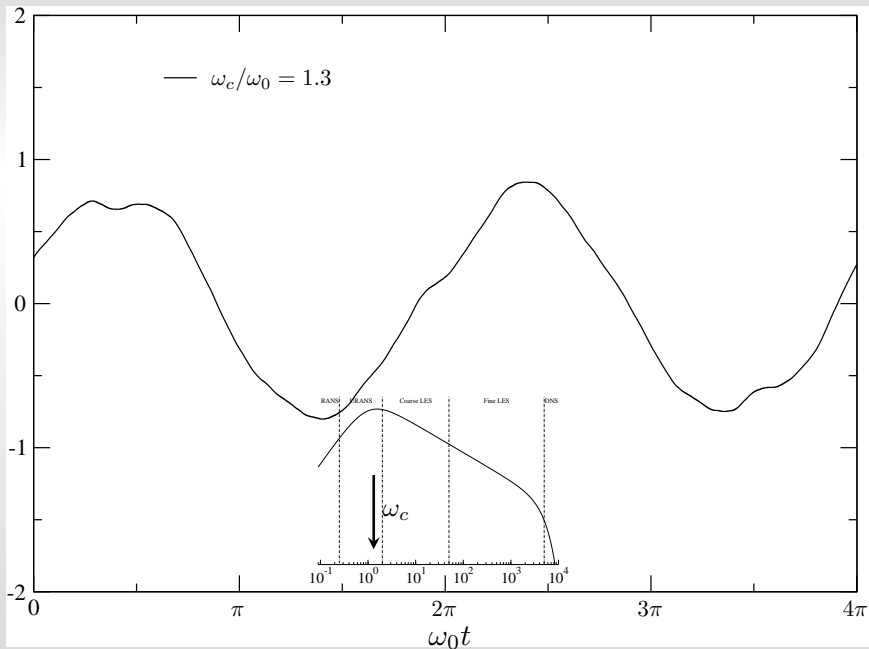


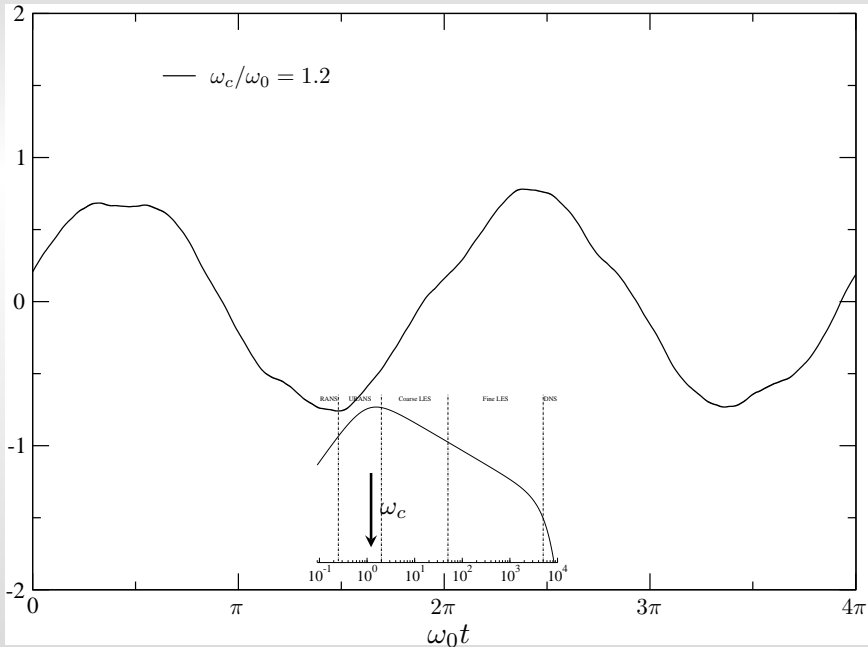


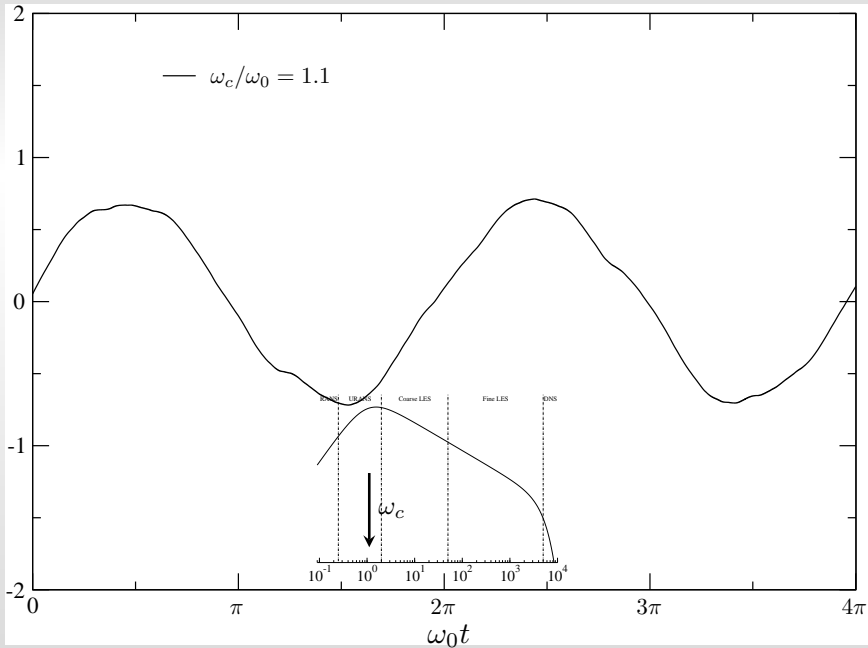


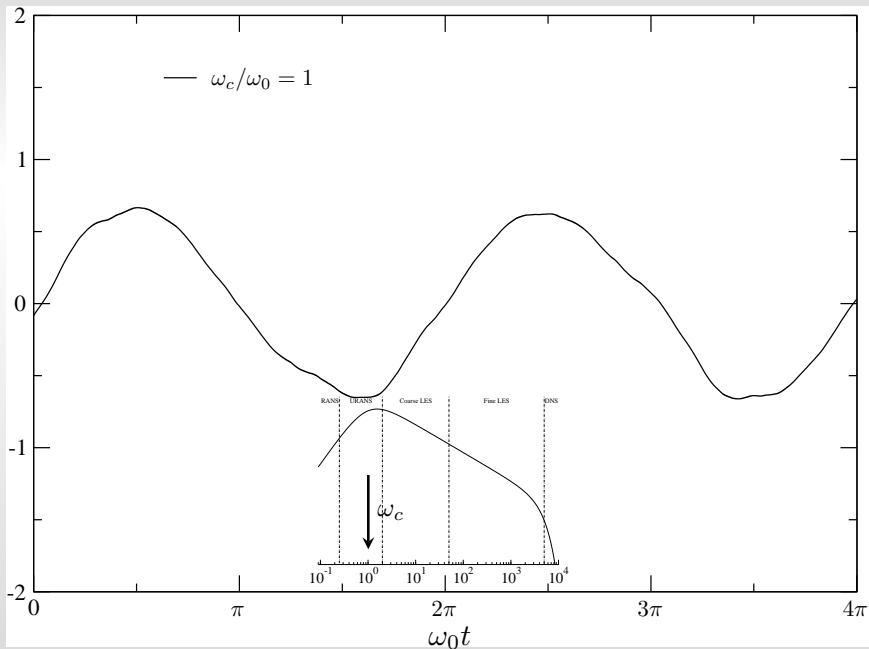


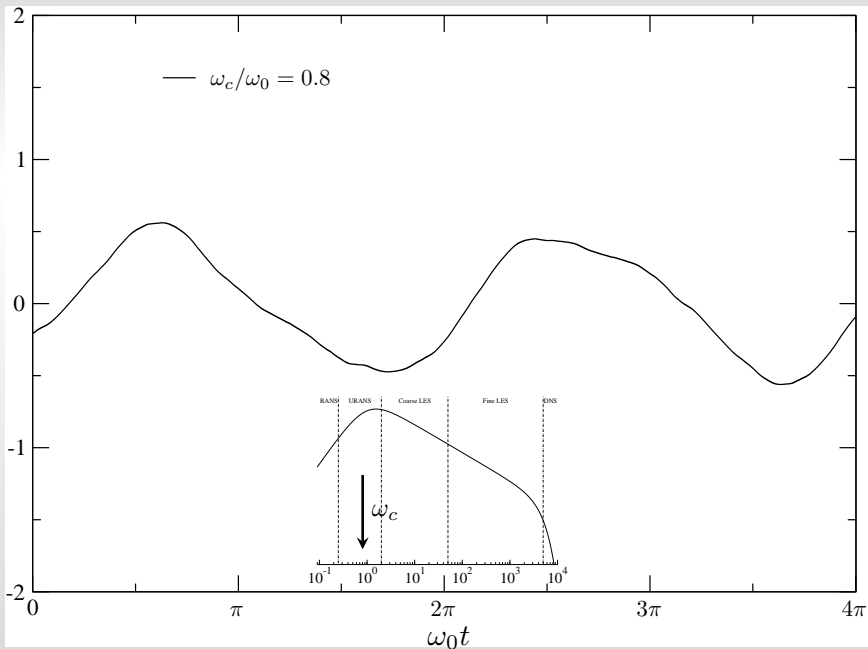


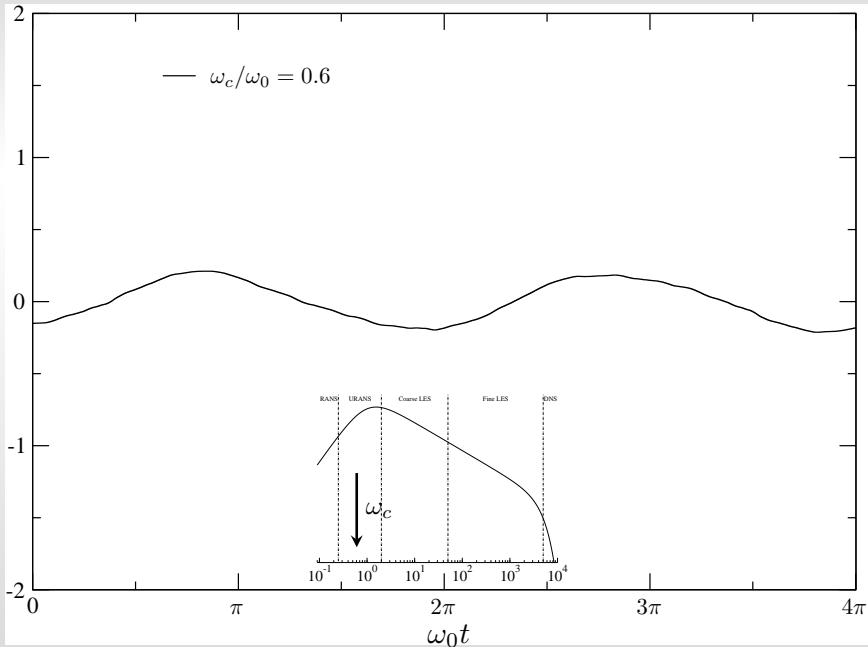


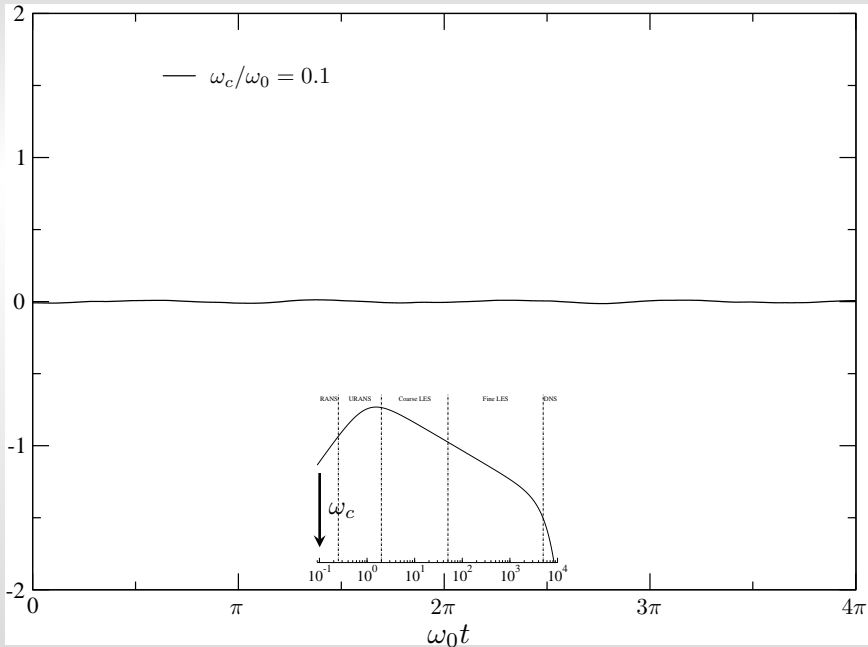


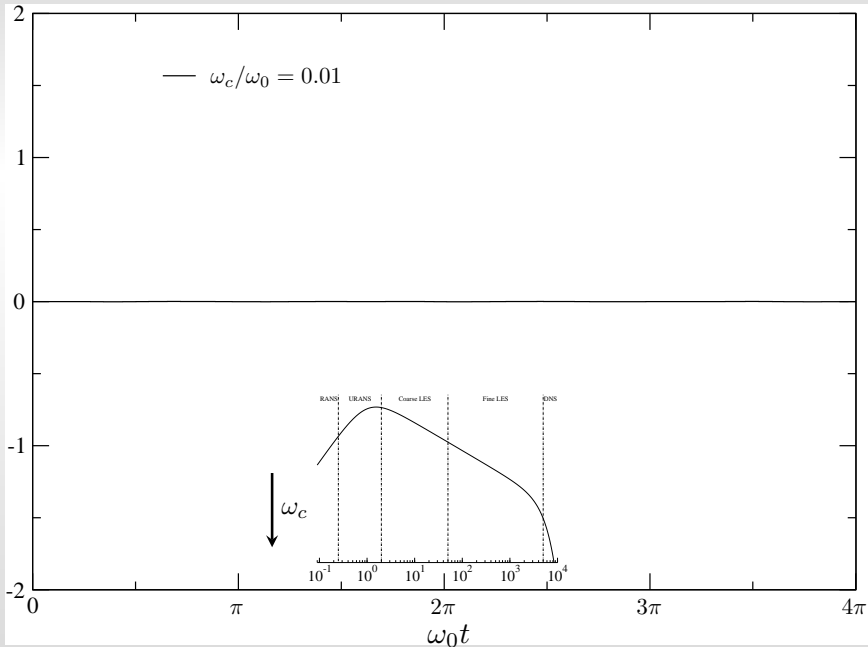












Plan de la présentation

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 : $\tau(u_i, u_j) = \widetilde{u_i u_j} - \tilde{u}_i \tilde{u}_j$
 $\tau(u_i, u_j, u_k) = \widetilde{u_i u_j u_k} - \tilde{u}_i \tau(u_j, u_k) - \tilde{u}_j \tau(u_i, u_k) - \tilde{u}_k \tau(u_i, u_j) - \tilde{u}_i \tilde{u}_j \tilde{u}_k$

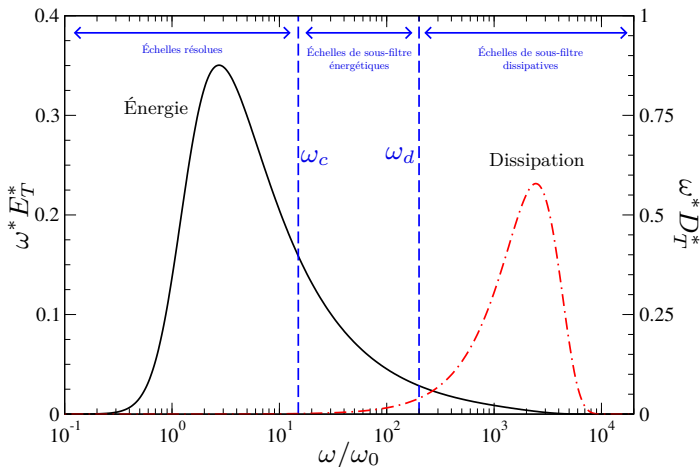
✓ Formellement identique aux équations pour le tenseur de Reynolds en RANS

✓ 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 ω_c

Lien avec la fréquence de coupure

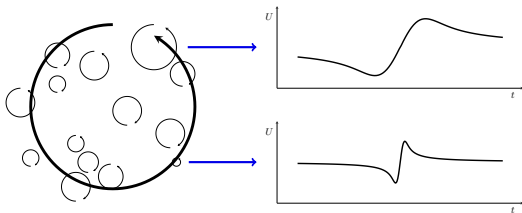
✓ Évaluation de r en fonction de ω_c :

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

$E_T(\omega)$ = 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)

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

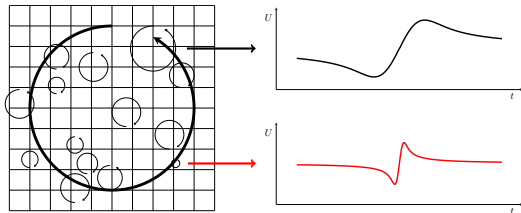
Lien avec la fréquence de coupure

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

✓ Fréquence de coupure ω_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 Δ : $\omega_c = U_s \kappa_c = U_s \frac{2\pi}{2\Delta}$



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

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 ε)
 - \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

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

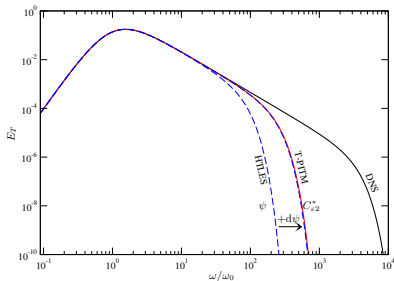
- ✓ Préserve les atouts du T-PITM :
 - ▷ Fondations solides, dérivation depuis les équations du mouvement
 - ▷ Méthodologie : H-equivalence

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 ψ 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 :

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

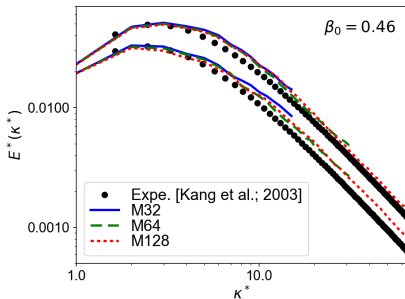
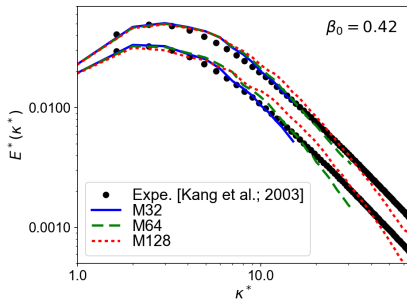
Calibration

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

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

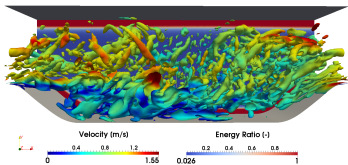
✓ Cas de la décroissance de turbulence homogène $Re_\lambda = 720$, par rapport aux données expérimentales de Kang et al., 2003

✓ code_saturne, développé par EDF (Archambeau et al., 2004)

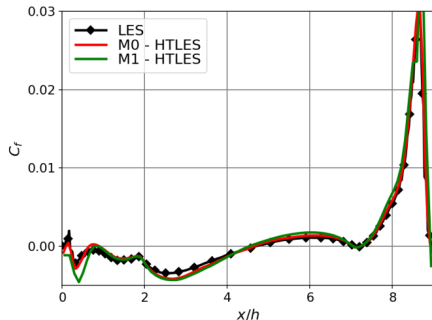
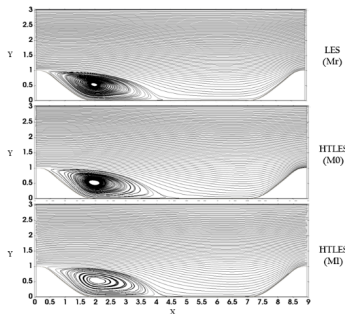


Exemples d'applications

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

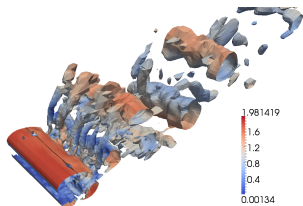


- ✓ $Re_b = 10600$
- ✓ LES réf. de Breuer et al., 2006 avec 12×10^6 cellules
- ✓ Code_Saturne
- ✓ HTLES - $k-\omega$ -SST et HTLES - $BL-\overline{v^2}/k$
- ✓ $M0=160 \times 160 \times 80 = 2 \times 10^6$ cellules (facteur 6)
- ✓ $M1=80 \times 80 \times 40 = 256,000$ cellules (facteur 50)

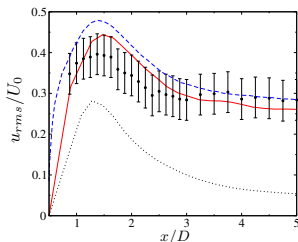
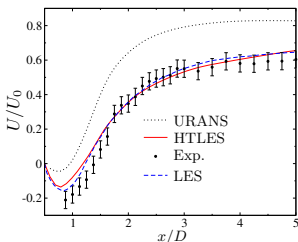


Exemples d'applications

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



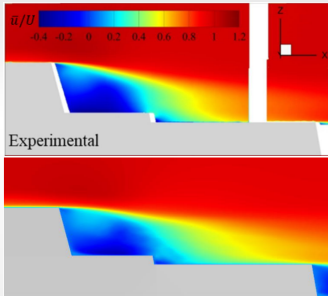
- ✓ $Re = 21400$
- ✓ Code_Saturne
- ✓ HTLES - $k-\omega$ -SST
- ✓ 0.5×10^6 cellules



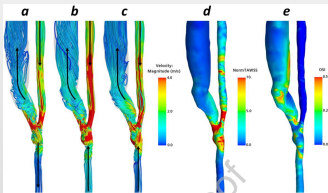
- ✓ Exp.: Lyn et al., 1995
- ✓ LES: Cao and Tamura, 2016 avec 75×10^6 cellules (facteur 150)

Exemples d'applications

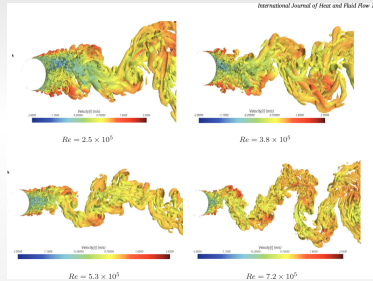
Code commercial StarCCM+



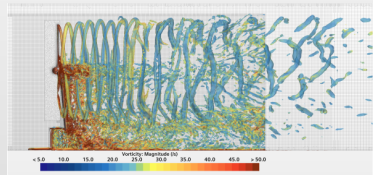
Sillage d'une frégate (Mucha, 2021)



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

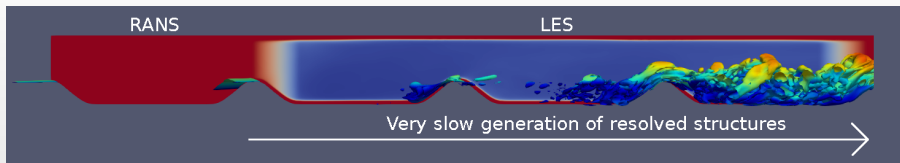
3 Approche active

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

4 Conclusions

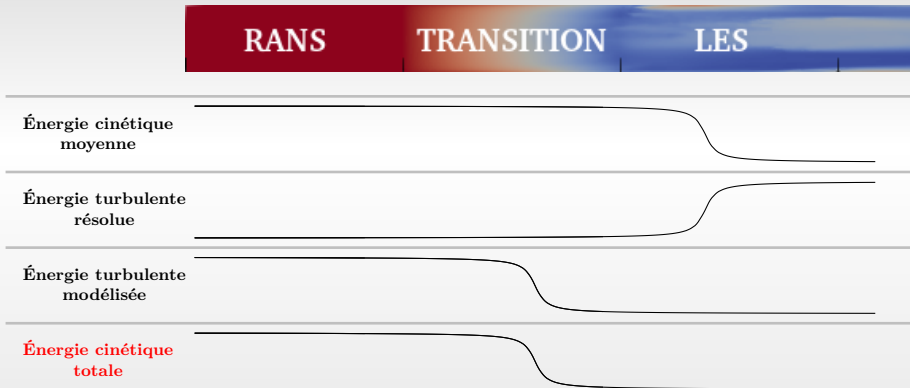
Problème de zone grise

- ✓ 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



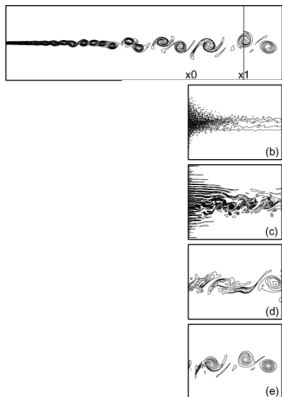
⇒ Perte fondamentale d'énergie mécanique !

⇒ 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

$$\frac{d\tilde{u}_i}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{P}}{\partial x_i}$$

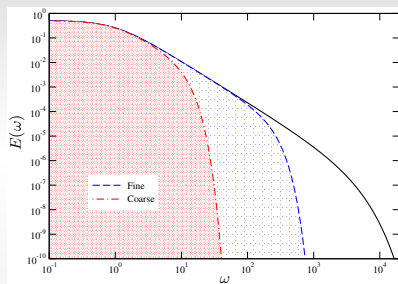
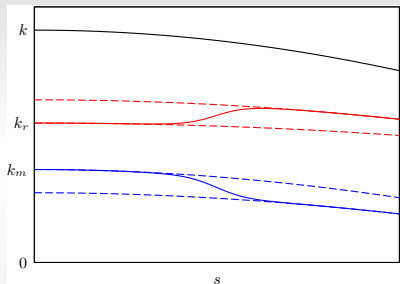
$$+ \frac{\partial}{\partial x_k} [2(\nu + \nu_{\text{sfs}}) \tilde{s}_{ik}] + f_i$$

- ✓ 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 Δ

✓ 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 9×9

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

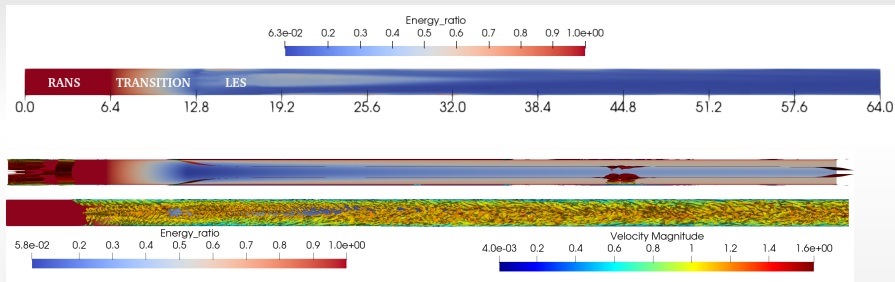
✓ N'influence pas la vitesse moyenne

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

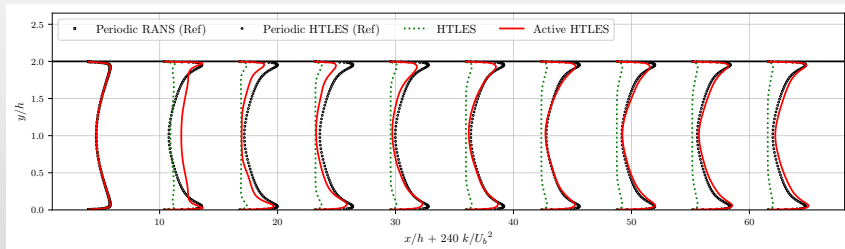
⇒ Résout le problème de la perte d'énergie

Application à un écoulement en canal

(Modèle hybride = HTLES)

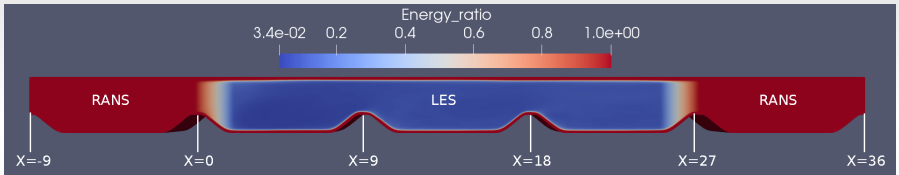


Isosurfaces $Q = 0.05U_b^2/h^2$



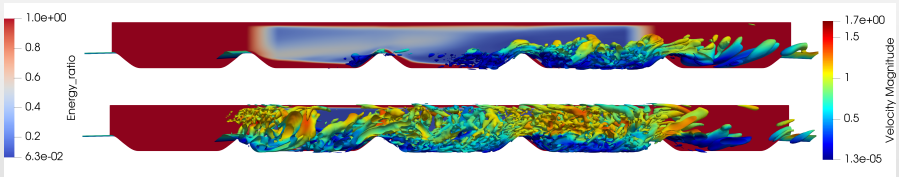
Profils d'énergie turbulente totale (résolue+modélisée)

Collines



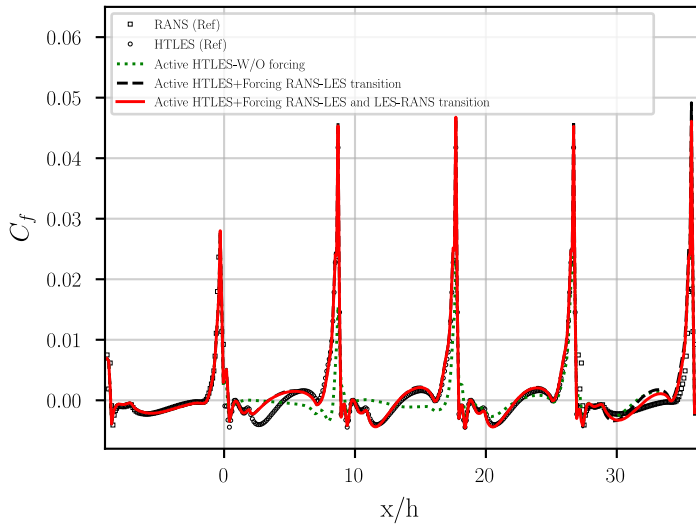
✓ Sans forçage

✓ Avec forçage

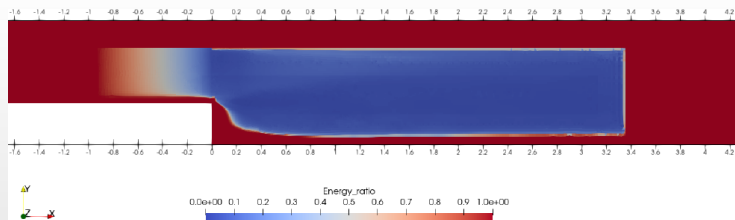


Isosurfaces $Q = 0.2U_b^2/h^2$

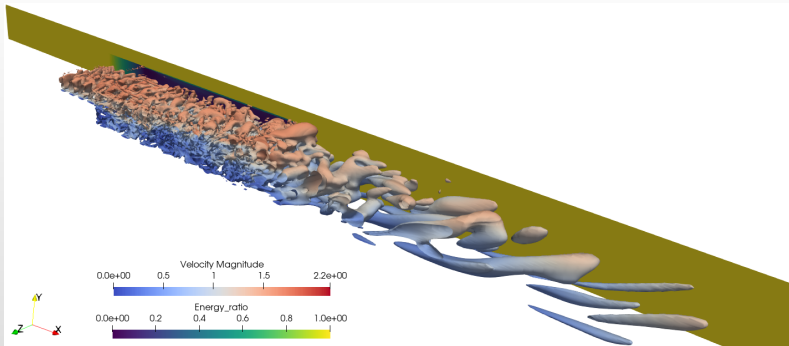
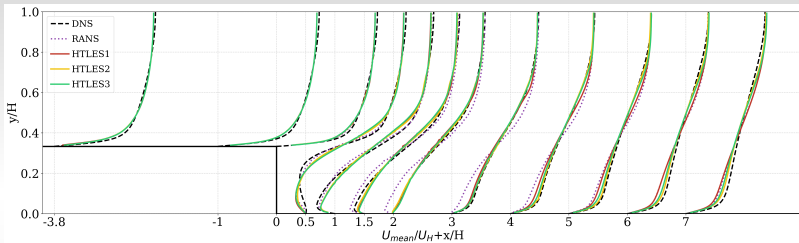
Collines



Marche descendante



Isocontours de la partition d'énergie (r)



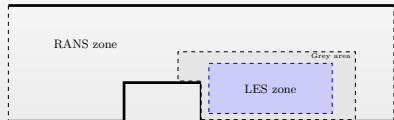
Projets en cours

- ✓ Application à un jet en crossflow

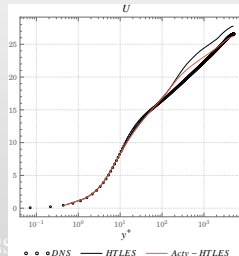


Iso-surfaces du critère Q
(Mastripolito, Manceau, and Bruel, 2022)

- ✓ 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.