



Production turbulente en aval d'une grille fractale

Nicolas Mazellier, Carlo Bruera, Christophe Baudet, John Christos Vassilicos

► To cite this version:

Nicolas Mazellier, Carlo Bruera, Christophe Baudet, John Christos Vassilicos. Production turbulente en aval d'une grille fractale. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. ⟨hal-03361775⟩

HAL Id: hal-03361775

<https://hal.science/hal-03361775v1>

Submitted on 1 Oct 2021

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.



HAL Authorization

Production turbulente en aval d'une grille fractale

Nicolas Mazellier^{†‡}, Carlo Bruera[†], Christophe Baudet[‡] & John Christos Vassilicos[†]

[†]Department of Aeronautics, Imperial College London, SW7 2AZ, Royaume-Uni

[‡]Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels, UJF, F-38041 Grenoble, France

Correspondant : n.mazellier@imperial.ac.uk

Résumé :

La zone de production générée en aval d'une grille fractale de maille carrée est étudiée au travers de mesures expérimentales de vitesse et de vorticité. Cette étude révèle que la position du pic de production est indépendante de la vitesse moyenne imposée dans la soufflerie. Les mesures de vitesse dans le voisinage immédiat de la grille mettent en évidence la présence d'oscillations à grande échelle (15cm) qui persistent sur une grande distance en aval de la grille. En parallèle, une turbulence multi-échelle est progressivement produite en s'éloignant de la grille sous la forme de bouffées turbulentes locales comme en témoignent les signaux de vitesse et de vorticité. La comparaison simultanée entre la vitesse grande échelle et la vorticité petite échelle montre l'existence de fortes corrélations entre ces champs.

Abstract :

The production region generated in the lee of a fractal square grid is investigated by means of experimental measurements of velocity and vorticity. This study shows that the position of the production peak is independant of the inlet flow velocity in the wind-tunnel. Velocity measurements in the immediate neighbourhood of the grid reveal the presence of large-scale oscillations which are well-defined in space rather than in time (15cm) and persist for a long way in the lee of the grid. At the same time, turbulence is progressively produced in form of local turbulent bursts as evidenced by velocity and vorticity signals. The comparison of simultaneous large-scale velocities and small-scale vorticity components shows a strong correlation between these fields.

Mots-clefs :

for age multi-échelle ; vorticité/vitesse ; production turbulente

1 Introduction

La turbulence est constituée de structures à une multitude d'échelle, souvent en équilibre, qui résultent de mécanismes non-linéaires de transfert d'énergie [Frisch (1995)]. Afin de mieux comprendre cette nature multi-échelle et la dynamique de la turbulence nous proposons ici d'étudier expérimentalement la turbulence générée en aval d'une grille fractale développée au sein du groupe TMFC de l'Imperial College [Hurst *et al.* (2007)]. La particularité de ce type de grille est d'être construite sur une série d'itérations d'un motif de base à différentes échelles ceci ayant pour objectif de créer un forçage multi-échelle de l'écoulement contrairement aux grilles à mailles régulières [Comte-Bellot *et al.* (1971)]. Le motif de base de la grille utilisée pour la présente étude est une maille carrée comme l'illustration la figure 1.

Un total de 5 paramètres permet de caractériser entièrement la grille fractale : sa taille totale définie par la dimension T de la soufflerie, le nombre d'échelles (ou itérations) N du motif de base, le rapport t_r entre la plus grande (t_{max}) et la plus petite largeur, le rapport t_L entre la plus grande (L_{max}) et la plus petite longueur et la maille effective de la grille $M_{eff} = \frac{4T^2}{P} \sqrt{1 - \sigma}$ (avec P le périmètre de blocage de l'écoulement et σ la solidité de la grille) qui donne une estimation de la maille moyenne sur toute la surface de la grille. Nous avons utilisé pour cette

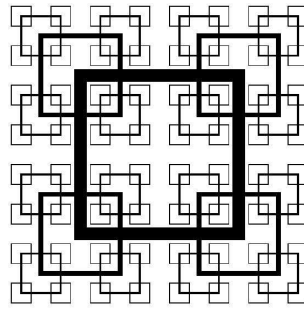


FIG. 1 – Schéma de la grille fractale, $L_{max} \approx 24cm$ et $t_{max} \approx 3cm$

étude une grille dont le nombre d'échelle N est égal à 4. Les rapports d'épaisseur et de longueur t_r et t_L de la grille en question sont égaux à 17 et 8 respectivement. La maille effective M_{eff} de la grille est environ égale à $2.7cm$. De plus, cette grille se caractérise par une solidité σ de 25 % ce qui est relativement faible en comparaison à des grilles à maillage régulier ($\sigma^{reg} \approx 34 \%$).

2 Dispositifs expérimentaux

2.1 Soufflerie d'essai

Les résultats présentés ici ont été obtenus dans une soufflerie à air fonctionnant en boucle ouverte. La veine d'essai, dont la section est un carré de côté $T = 46cm$, mesure environ $4m$ de long. La vitesse maximale atteinte en l'absence d'obstacle dans la veine de mesure est d'environ $40m/s$. Le taux de turbulence résiduelle mesuré le long de l'axe du tunnel est inférieur à 0.3 %.

2.2 Mesure de vitesse

Les champs de vitesse ont été mesurés à l'aide d'un dispositif d'anémométrie à fils chauds à température constante. Nous utilisons une sonde simple DANTEC 55P01 sur laquelle est monté un fil Platiniun/Tungsten de diamètre $5\mu m$ et de longueur sensible $1.25mm$. Cette sonde est connectée à un anémomètre DISA 55M10 fonctionnant en mode température constante avec un coefficient de surchauffe de 0.5. Le signal de sortie de l'anémomètre est alors conditionné grâce à un filtre/amplificateur DISA 55D26. Le temps de réponse de ce montage a été mesuré entre $25\mu s$ et $50\mu s$ suivant la vitesse moyenne de l'écoulement. Le dispositif est étalonné au début et à la fin de chaque expérimentation au moyen d'une mesure de vitesse réalisée grâce à un tube de Pitot relié à un micro-manomètre différentiel FURNESS CONTROLS.

2.3 Mesure de vorticité

Le champ de vorticité $\omega(x, t)$ est étudié au moyen d'un dispositif expérimental de diffusion ultrasonore [Poulain *et al.* (2004)]. Le principe de la mesure repose sur la diffusion d'ondes sonores en présence de structures vorticitaires [Kraichnan (1953)]. Une photo du banc expérimental est présentée sur la figure 2. Comme le montre cette photo, le banc de mesure a été adapté afin d'accueillir également la sonde à fil chaud. Les capteurs acoustiques sont diaphragmés à un diamètre sensible de $7cm$ afin de réduire la taille de la zone d'interrogation délimitée par l'intersection des faisceaux acoustiques incidents et reçus. Le volume acoustique V_{scatt} ainsi défini possède un allongement axial de l'ordre de $15cm$ et son centre est positionné à environ $30cm$ en amont des capteurs. Des mesures par an m trie à fil chaud n'ont révélé aucune modification majeure du champ de vitesse à petite et à grande échelle d e à la présence du

dispositif acoustique dans la veine d'essai.

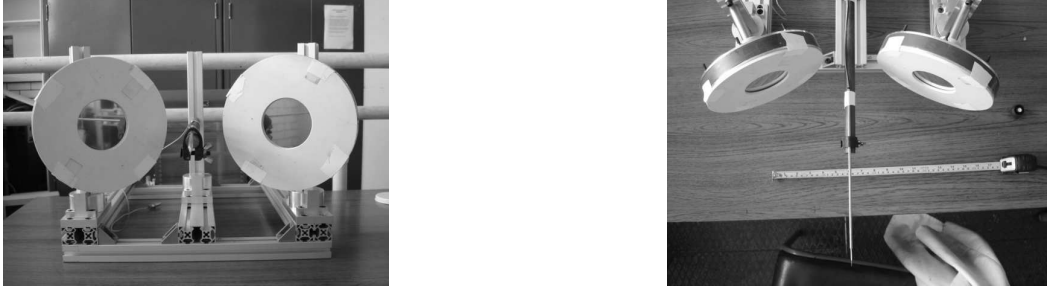


FIG. 2 – Photo du banc acoustique

Un des transducteurs émet une onde acoustique plane p_{inc} qui interagit avec le champ de vortécité de l'écoulement fluide. Le champ de pression diffusée p_{scatt} résultant de cette interaction peut être directement relié [Lund *et al.* (1989)] à une composante du champ de vortécité :

$$p_{scatt}(t) = p_{inc}(t) \cdot \omega_{\perp}(\mathbf{q}_{scatt}, t) \quad (1)$$

où ω_{\perp} est la composante de vortécité normale au plan de diffusion imposé par l'emplacement des transducteurs et \mathbf{q}_{scatt} le vecteur d'onde défini dans notre cas par :

$$\mathbf{q}_{scatt} = \frac{4\pi f_{inc}}{c} \sin\left(\frac{\theta_{scatt}}{2}\right) \frac{\mathbf{x}}{x} \quad (2)$$

où f_{inc} est la fréquence de l'onde incidente et θ_{scatt} l'angle de diffusion entre l'émetteur et le récepteur. Dans le cadre de la présente étude le vecteur d'onde \mathbf{q}_{scatt} est aligné avec l'axe de la soufflerie. La mesure par diffusion ultrasonore est donc sensible à l'évolution temporelle d'un mode spatial de Fourier d'une composante du champ de vortécité $\omega_{\perp}(\mathbf{q}_{scatt}, t)$ défini comme :

$$\omega_{\perp}(\mathbf{q}_{scatt}, t) = \int \int \int_{V_{scatt}} \omega_{\perp}(\mathbf{x}, t) e^{-i\mathbf{q}_{scatt} \cdot \mathbf{x}} d^3x \quad (3)$$

Les mesures de diffusion acoustique ont été concentrées à un nombre d'onde $q_{scatt} \approx 1700m^{-1}$ qui correspond à une échelle spatiale d'environ $4mm$ ce qui est de l'ordre de grandeur de l'échelle de Taylor λ de l'écoulement. Le dispositif acoustique permet donc de mesurer la dynamique temporelle du champ de vortécité à petite échelle.

3 Résultats et discussion

3.1 Définition de la zone de production

L'évolution du taux de turbulence u_{rms}/U le long l'axe de la soufflerie ainsi que le coefficient d'auto-corrélation $\rho_{uu}(\tau) = \frac{\langle u(t)u(t+\tau) \rangle_t}{\langle u(t)^2 \rangle_t}$ du champ de vitesse mesuré à $x = 10M_{eff}$ sont tracés sur la figure 3. Ces mesures ont été obtenues pour différentes vitesses V_{∞} en entrée de la veine d'essai : $5m/s$, $10m/s$ et $15m/s$.

De manière identique aux résultats observés par Hurst *et al.* (2007), le taux de turbulence révèle la présence de deux régions aux comportements distincts. Nos mesures montrent que la transition et le comportement de ces deux régions est indépendante de la vitesse V_{∞} imposée en entrée de veine d'essai. Jusqu'à $x \approx 45M_{eff}$, le taux de turbulence croît fortement pour

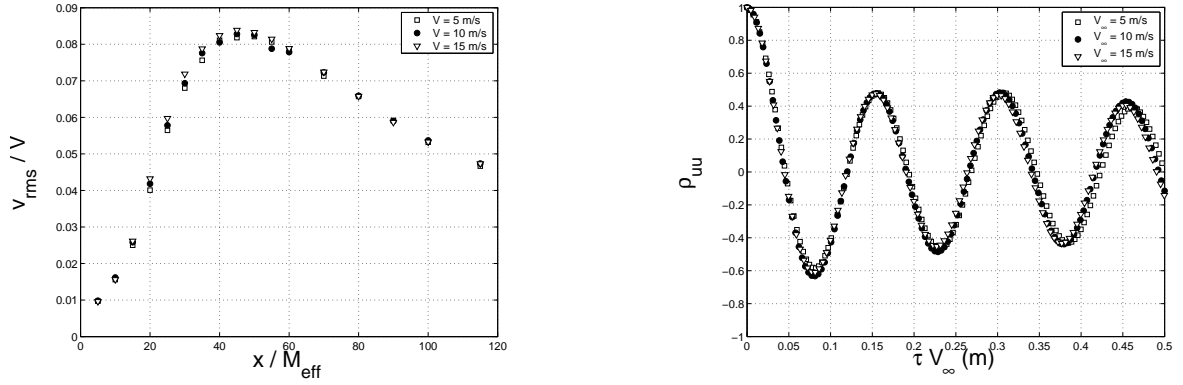


FIG. 3 – Evolution spatiale du taux de turbulence le long de l’axe de la soufflerie (gauche) et de l’auto-corrélation de vitesse à $x = 10M_{eff}$ (droite) pour différentes vitesses en entrée de veine

atteindre un maximum d’environ 8 %. Cette région, dite zone de production, est marquée par la présence d’une instabilité grande échelle comme l’illustre l’évolution de l’auto-corrélation de vitesse ρ_{uu} obtenue à $x = 10M_{eff}$. Afin de tenir compte de l’effet de convection, le retard temporel τ est pondéré par la vitesse V_{∞} . Cette représentation fait clairement ressortir la présence de cette structure grande échelle dont la taille caractéristique est de 15cm ce qui ne semble pas correspondre de manière évidente à une échelle caractéristique de la grille (M_{eff} , L_{max} , t_{max} , T). En aval de la zone de production, une région de turbulence en décroissance est observée comme l’ont montré les résultats obtenus par Hurst *et al.* (2007).

Les résultats présentés par la suite concernent uniquement la région de production turbulente de l’écoulement et ont été obtenus pour une vitesse V_{∞} en entrée de veine de 10m/s.

3.2 Instabilité à grande échelle

Les évolutions du spectre d’énergie $E(q)$ (anémométrie à fil chaud) et du coefficient d’auto-corrélation du champ de vorticité $\rho_{\omega\omega}(\tau) = \frac{\langle \omega(t)\omega(t+\tau) \rangle_t}{\langle \omega(t)^2 \rangle_t}$ (diffusion acoustique) sont représentées sur la figure 4. Ces mesures ont été réalisées dans la zone de production à $10M_{eff}$ et $20M_{eff}$ en aval de la grille.

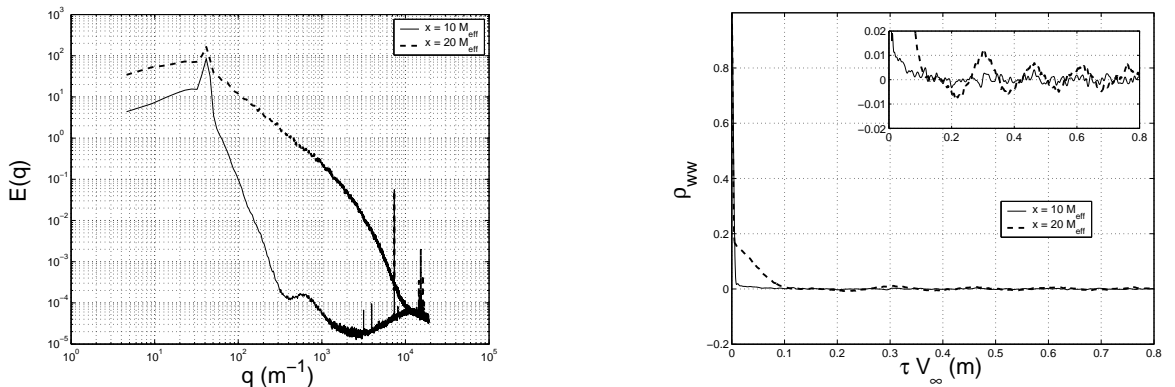


FIG. 4 – Evolution des spectres d’énergie (gauche) et de l’auto-corrélation de vorticité (droite) à $x = 10M_{eff}$ et $x = 20M_{eff}$ pour $V_{\infty} = 10m/s$

Les spectres d’énergie sont très nettement marqués par la présence de la structure grande échelle (pic à $q = 40m^{-1}$ environ) dont l’énergie domine les fluctuations de vitesse. A $x =$

$10M_{eff}$, le champ de vitesse est uniquement contrôlé par la structure grande échelle comme le confirme les mesures de vorticité par diffusion acoustique. En effet, l'autocorrélation de vorticité $\rho_{\omega\omega}$ est très proche de zéro ce qui signifie que le niveau de vorticité présente à petite échelle est extrêmement faible. En revanche, plus en aval de la grille la production turbulente commence à agir comme l'illustre le spectre d'énergie obtenu à $x = 20M_{eff}$. A cette position, bien que la structure à grande échelle soit toujours présente, le spectre d'énergie exhibe une manifestation d'activité turbulente avec l'apparition d'une loi de puissance s'étendant sur plus d'une décade. Ce phénomène se confirme sur les mesures de vorticité réalisées à $x = 20M_{eff}$ comme le prouve la présence d'un niveau de corrélation à temps long classiquement observé dans des écoulements turbulents développés [Poulain *et al.* (2006)]. Le zoom de la corrélation de vorticité proche de la valeur nulle présenté dans l'insert révèle la présence d'oscillation du coefficient $\rho_{\omega\omega}$ à $x = 20M_{eff}$ signe d'une interaction entre le champ de vitesse grande échelle et le champ de vorticité à petite échelle.

3.3 Corrélation vitesse/vorticité

Afin d'appréhender plus en détail ces interactions nous avons réalisé des mesures simultanées de vitesse et de vorticité. Pour cette expérience, le volume acoustique est centré à $20M_{eff}$ en aval de la grille et la sonde à fil chaud est placée au centre du volume acoustique. Les résultats obtenus dans cette configuration sont reportés dans la figure 5. La figure de gauche représente l'évolution simultanée sur un intervalle de $0.5s$ du champ de vitesse u (haut), de la dissipation $\epsilon = 15\nu \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2$ (milieu) et de l'ensrophie ω^2 (bas). Toutes ces quantités ont été normalisées par leur écart-type. De plus, le signal d'ensrophie a été seuillé afin d'éliminer le bruit aérodynamique ambiant. Alors que le champ de vitesse u est dominé par la signature des grandes échelles, le champ de dissipation est par construction sensible aux propriétés à petite échelle. La comparaison directe de ces deux quantités avec le champ de vorticité pourrait témoigner des influences réciproques entre u , ϵ et ω . Le signal de vitesse illustre l'existence de bouffées turbulentes très localisées et dont l'énergie dépasse plusieurs écart-type. Ces bouffées turbulentes correspondent à des zones où la dissipation et l'ensrophie sont très intenses. La ressemblance entre les signaux de dissipation et de vorticité sont tout à fait frappants. Afin de mettre en évidence et de quantifier les interactions entre ces différentes quantités nous nous intéressons au coefficients d'inter-corrélation $\rho_{\omega u}(\tau) = \frac{\langle \omega(t)u(t+\tau) \rangle_t}{\sqrt{\langle \omega(t)^2 \rangle_t} \sqrt{\langle u(t)^2 \rangle_t}}$ et $\rho_{\omega \epsilon}(\tau) = \frac{\langle \omega(t)\epsilon(t+\tau) \rangle_t}{\sqrt{\langle \omega(t)^2 \rangle_t} \sqrt{\langle \epsilon(t)^2 \rangle_t}}$ dont les évolutions sont tracées à droite sur la figure 5.

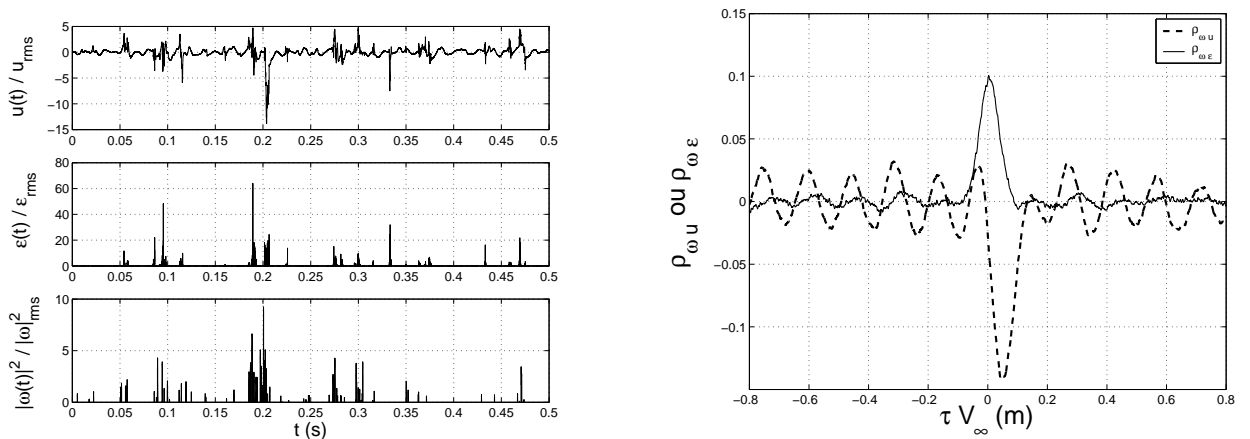


FIG. 5 – Comparaison des dynamiques des champs à grande échelle et à petite échelle

L'inter-corrélation entre la vorticité ω et la dissipation ϵ présente un maximum égal à 10 % centré autour du retard nul ce qui montre que ces deux quantités apparaissent simultanément dans l'écoulement. La valeur maximale de l'inter-corrélation, environ -15%, entre vorticité ω et vitesse u est atteinte pour un retard de 5ms correspondant à une distance de 5cm. Ce décalage ne semble pas pouvoir s'expliquer par une erreur de positionnement de la sonde à fil chaud. Toutefois des tests sont en cours afin de déterminer si le retard mesuré est consistant avec la physique de l'écoulement. Cette courbe tend à montrer que les bouffées d'énergie turbulentes visibles sur les signaux de vitesse sont légèrement déphasées avec l'apparition des bouffées vorticitaires.

4 Conclusions

L'écoulement généré en aval d'une grille fractale à maille carrée produisant un forçage multi-échelle est étudié expérimentalement au travers de mesures du champ de vitesse par anémométrie à fil chaud et du champ de vorticité par diffusion ultrasonore. Nos mesures confirment l'existence d'une zone de production turbulente dans voisinage proche de la grille qui se caractérise par une augmentation du taux de turbulence jusqu'à un maximum que nous montrons être indépendant de la vitesse moyenne de l'écoulement. Le coefficient d'auto-corrélation de vitesse mesurés dans le voisinage de la grille révèlent l'existence d'une instabilité grande échelle dont la taille est indépendante de la vitesse de convection moyenne de l'écoulement et ne correspond pas de manière évidente aux échelles caractéristiques de la grille. Alors que cette structure grande échelle persiste sur une longue distance en aval de la grille, les mesures de vitesse et de vorticité mettent en évidence l'apparition d'une turbulence multi-échelle en développement suffisamment loin de la grille. L'étude simultanée des champs grande échelle (vitesse) et petite échelle (vorticité) montrent l'existence d'une forte dépendance entre les bouffées turbulentes apparaissant en aval de la grille et la création de vorticité et de dissipation à petite échelle comme le confirment les niveaux d'inter-corrélations entre ces différentes quantités.

Ce travail est supporté par Marie Curie Training Network (Fluid Mechanical Stirring and Mixing : the Lagrangian approach) et la Délégation Générale pour l'Armement.

Références

- Frisch, U. 1995 Turbulence *Cambridge University Press*
- Comte-Bellot, G., Corrsin, S. 1971 Simple Eulerian time correlation of full- and narrow-band velocity signals in grid-generated 'isotropic' turbulence *J. Fluid Mech.* **48** 273-337
- Hurst, D., Vassilicos, J.C. 2007 Scalings and decay of fractal-generated turbulence *Physics of Fluids* **19** à paraître
- Kraichnan, R.H. 1953 The scattering of sound in a turbulent medium *J. Acoust. Soc. Am.* **25** 1096-1104
- Lund, F., Rojas, C. 1989 Ultrasound as a probe of turbulence *Physica D* **37** 508-514
- Poulain, C., Mazellier, N., Gervais, P., Baudet, C., Gagne, Y. 2004 Spectral vorticity and lagrangian velocity measurements in turbulent jets *Flow, Turb. Comb.* **72** 245-271
- Poulain, C., Mazellier, N., Chevillard, L., Gagne, Y., Baudet, C. 2006 Dynamics of spatial Fourier modes in turbulence : sweeping effect, long-time correlations and temporal intermittency *Eur. Phys. J. B* **53** 219-224