Aussois 2005

Visualisation en mécanique des fluides : illustration

F.S. Godeferd

with F. Laadhari, S. Amalfi, L. Lollini, L. Liechtenstein, C. Cambon

Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique Ecole Centrale de Lyon

April 2005

CTRL-L switch



- Généralités
- Critères de visualisation ; définitions
- Exemple de la turbulence homogène
- Écoulements inhomogènes avec parois : canal plan, turbulence diffusive
- Un écoulement très appliqué : l'étage compresseur de l'avion supersonique
- Visualisation de surfaces complexes pour la théorie des ondes



Description of the second					Description of the second					Description of the second				
0000400	8.906011e-01	8.926292e-01	8.929120e-01	8.915347e-01	0000400	8.906011e-01	8.926292e-01	8.929120e-01	8.915347e-01	0000400	8.906011e-01	8.926292e-01	8.929120e-01	8.915347e-01
0000420	8.887561e-01	8.849788e-01	8.807253e-01	8.766924e-01	0000420	8.887561e-01	8.849788e-01	8.807253e-01	8.766924e-01	0000420	8.887561e-01	8.849788e-01	8.807253e-01	8.766924e-01
0000440	9 7594200 01	8 7748000 01	8 775626a 01	0 2111600 01	0000440	9 7594200 01	8 7748000 01	9 7756260 01	0 2111600 01	0000440	9 7594200 01	8 7748000 01	9 7756260 01	0 2111600 01
0000440	0.7304300-01	0.77480002-01	8.7730308-01	9.3111002-01	0000440	0.7304300-01	8.77480000-01	8.7730308-01	9.3111002-01	0000440	0.7304300-01	8.77480002-01	8.7730302-01	9.3111002-01
0000460	9.001048e-01	9.025229e-01	9.029399e-01	9.034981e-01	0000460	9.001048e-01	9.025229e-01	9.029399e-01	9.034981e-01	0000460	9.001048e-01	9.025229e-01	9.029399e-01	9.034981e-01
0000500	9.042482e-01	9.049028e-01	9.055738e-01	9.063430e-01	0000500	9.042482e-01	9.049028e-01	9.055738e-01	9.063430e-01	0000500	9.042482e-01	9.049028e-01	9.055738e-01	9.063430e-01
0000520	9 070675e-01	9 075997e-01	9 0772380-01	9 0723720-01	0000520	9 0706750-01	9 0759970-01	9 0772380-01	9 0723720-01	0000520	9 0706750-01	9 075997e-01	9 0772380-01	9 0723726-01
0000520	0.0000000000000000000000000000000000000	0.0755576-01	0.0172000-01	0.0720720-01	0000520	0.0000000000000000000000000000000000000	0.0735376-01	0.0172000-01	0.0020120-01	0000520	0.0000000000000000000000000000000000000	0.070501 01	0.0172000-01	0.0720720-01
0000540	9.063439e-01	9.052594e-01	9.043372e-01	9.036951e-01	0000540	9.063439e-01	9.052594e-01	9.043372e-01	9.036951e-01	0000540	9.063439e-01	9.052594e-01	9.043372e-01	9.036951e-01
0000560	9.033183e-01	9.031336e-01	9.029699e-01	9.027484e-01	0000560	9.033183e-01	9.031336e-01	9.029699e-01	9.027484e-01	0000560	9.033183e-01	9.031336e-01	9.029699e-01	9.027484e-01
0000600	9.023871e-01	9.017910e-01	9.007556e-01	8.990286e-01	0000600	9.023871e-01	9.017910e-01	9.007556e-01	8.990286e-01	0000600	9.023871e-01	9.017910e-01	9.007556e-01	8.990286e-01
0000620	8 0621/70 01	8 0240770 01	8 8727800 01	8 8112500 01	0000620	8 0621/70 01	8 0240770 01	8 872780a 01	8 8112500 01	0000620	8 0621470 01	8 0240770 01	8 8727800 01	8 8112500 01
0000020	8.9031476-01	8.9240778-01	8.8727808-01	8.8112300-01	0000020	8.9031476-01	8.9240776-01	8.8727800-01	8.8112306-01	0000020	8.9031476-01	8.9240778-01	8.8727800=01	8.8112308-01
0000640	8.746425e-01	8.690490e-01	8.654355e-01	8.644411e-01	0000640	8.746425e-01	8.690490e-01	8.654355e-01	8.644411e-01	0000640	8.746425e-01	8.690490e-01	8.654355e-01	8.644411e-01
0000660	8.661366e-01	8.699704e-01	8.750978e-01	8.806005e-01	0000660	8.661366e-01	8.699704e-01	8.750978e-01	8.806005e-01	0000660	8.661366e-01	8.699704e-01	8.750978e-01	8.806005e-01
0000700	8 8573670-01	8 8989590-01	8 9255990-01	8 9339200-01	0000700	8 8573670-01	8 8989590-01	8 9255990-01	8 9339200-01	0000700	8 8573670-01	8 8989590-01	8 9255996-01	8 9339208-01
0000720	8 033400- 01	8 800000- 01	0.00000000000	8 800245- 01	0000720	8 000400- 01	8 800000- 01	0.000700- 01	8 800345- 01	0000720	8 033460- 01	8 800000- 01	0.00000000000	8 800345- 01
0000720	8.9234600-01	a.8960006-01	0.00070300-01	8.8092450-01	0000720	8.9234600-01	9.990006-01	0.000/006-01	8.8092450-01	0000720	8.9234600-01	9.990006-01	0.00070396-01	8.8092450-01
0000740	8.764478e-01	8.752694e-01	8.771546e-01	8.775897e-01	0000740	8.764478e-01	8.752694e-01	8.771546e-01	8.775897e-01	0000740	8.764478e-01	8.752694e-01	8.771546e-01	8.775897e-01
0000760	9.311950e-01	9.000228e-01	9.025682e-01	9.028599e-01	0000760	9.311950e-01	9.000228e-01	9.025682e-01	9.028599e-01	0000760	9.311950e-01	9.000228e-01	9.025682e-01	9.028599e-01
0001000	0 033808e-01	9 041286e-01	0 047437e-01	0 052783e-01	0001000	0 0338080-01	9 041286e-01	0 047437e-01	0 052783e-01	0001000	0 0338080-01	9 041286e-01	0 047437e-01	9 052783e-01
0001000	0.053554 01	0.00000000000	0.000010 01	0.0527050-01	0001000	0.00000000-01	0.0000000 01	0.0000000	0.0527050-01	0001000	0.00000000-01	0.00000000000	0.000040 01	0.0521052-01
0001020	9.057554e-01	9.060290e-01	9.060248e-01	9.05668/e-01	0001020	9.05/554e-01	9.060290e-01	9.060248e-01	9.05668/e-01	0001020	9.05/554e-01	9.060290e-01	9.060248e-01	9.0566876-01
0001040	9.048867e-01	9.039211e-01	9.029285e-01	9.021724e-01	0001040	9.048867e-01	9.039211e-01	9.029285e-01	9.021724e-01	0001040	9.048867e-01	9.039211e-01	9.029285e-01	9.021724e-01
0001060	9.016937e-01	9.014211e-01	9.012632e-01	9.010529e-01	0001060	9.016937e-01	9.014211e-01	9.012632e-01	9.010529e-01	0001060	9.016937e-01	9.014211e-01	9.012632e-01	9.010529e-01
0001100	0 0072080 01	0 0022540 01	9 0045220 01	8 0811470 01	0001100	0 0072080 01	0 0022540 01	8 0045220 01	8 0811470 01	0001100	0 0072080 01	0 0022540 01	8 0045220 01	8 0811470 01
0001100	9.0073080-01	9.0023340-01	0.9943320-01	8.98114/0=01	0001100	9.0073088-01	9.0023340-01	0.03043320-01	0.90114/0=01	0001100	9.0073088=01	9.0023340-01	0.9943320-01	0.9011470-01
0001120	8.959020e-01	8.9247836-01	8.876141e-01	8.8149926-01	0001120	8.9590566-01	8.924/83e-01	8.876141e-01	8.8149926-01	0001120	8.9590206-01	8.924/836-01	8.876141e-01	8.814992e-01
0001140	8.746272e-01	8.677067e-01	8.618143e-01	8.579944e-01	0001140	8.746272e-01	8.677067e-01	8.618143e-01	8.579944e-01	0001140	8.746272e-01	8.677067e-01	8.618143e-01	8.579944e-01
0001160	8.569445e-01	8.587697e-01	8.628860e-01	8.684715e-01	0001160	8.569445e-01	8.587697e-01	8.628860e-01	8.684715e-01	0001160	8.569445e-01	8.587697e-01	8.628860e-01	8.684715e-01
0001200	8 747048e-01	8 809348e-01	8 865972e-01	8 9112140-01	0001200	8 747048e-01	8 809348e-01	8 865972e-01	8 9112140-01	0001200	8 747048e-01	8 809348e-01	8 865972e-01	8 9112140-01
0001230	9 020540+ 01	9 046904= 01	9 021500+ 01	0.0012120 01	0001200	8 020540+ 01	9 046904= 01	9 021500- 01	0.0012110 01	0001230	8 020E40e 01	9 046904= 01	9 021500= 01	0.0012170 01
0001220	8.9393408-01	0.9400940-01	8.9313008-01	0.0933420-01	0001220	0.9393408-01	0.9400940-01	8.9313008-01	0.0933420-01	0001220	0.9393400-01	0.9400940-01	8.9313006-01	0.0933420-01
0001240	8.844814e-01	8.790404e-01	8.764695e-01	8.773935e-01	0001240	8.844814e-01	8.790404e-01	8.764695e-01	8.773935e-01	0001240	8.844814e-01	8.790404e-01	8.764695e-01	8.773935e-01
0001260	8.774878e-01	9.303128e-01	8.990891e-01	9.020835e-01	0001260	8.774878e-01	9.303128e-01	8.990891e-01	9.020835e-01	0001260	8.774878e-01	9.303128e-01	8.990891e-01	9.020835e-01
0001300	9.021330e-01	9.025629e-01	9.032226e-01	9.036770e-01	0001300	9.021330e-01	9.025629e-01	9.032226e-01	9.036770e-01	0001300	9.021330e-01	9.025629e-01	9.032226e-01	9.036770e-01
0001220	0 0202720 01	0 0200480 01	0 0279720 01	0 022266a 01	0001220	0 0202720 01	0 0200480 01	0 0279720 01	0 0222660 01	0001220	0 0202720 01	0 0200480 01	0 0279720 01	0 0222660 01
0001520	0.0000000000000000000000000000000000000	0.0000000000000000000000000000000000000	0.0070702-01	3.0552000-01	0001520	0.00000000	0.0000000000000000000000000000000000000	0.007457 01	0.00002000-01	0001520	0.0000000000	0.0000000000000000000000000000000000000	0.007457 04	3.0552002-01
0001340	9.0263538-01	9.010887e-01	9.00/15/e-01	8.9980956-01	0001340	9.0263538-01	9.01688/e-01	9.00/15/e-01	8.9980956-01	0001340	9.0263536-01	9.010887e-01	9.00/15/e-01	9.9990926-01
0001360	8.991604e-01	8.987501e-01	8.984737e-01	8.982408e-01	0001360	8.991604e-01	8.987501e-01	8.984737e-01	8.982408e-01	0001360	8.991604e-01	8.987501e-01	8.984737e-01	8.982408e-01
0001400	8.979017e-01	8.974269e-01	8.967911e-01	8.959002e-01	0001400	8.979017e-01	8.974269e-01	8.967911e-01	8.959002e-01	0001400	8.979017e-01	8.974269e-01	8.967911e-01	8.959002e-01
0001420	8.944809e-01	8.921922e-01	8.886133e-01	8.834153e-01	0001420	8.944809e-01	8.921922e-01	8.886133e-01	8.834153e-01	0001420	8.944809e-01	8.921922e-01	8.886133e-01	8.834153e-01
0001440	8 7672010 01	8 6007340 01	8 6126730 01	8 545756o 01	0001440	8 7672010 01	8 6007340 01	8 6126730 01	8 5457560 01	0001440	8 7672010 01	8 6007340 01	8 6126730 01	8 5457560 01
0001440	0.7072910-01	0.090/346-01	0.0120756-01	0.3437308-01	0001440	0.7072910-01	0.090/346-01	0.0120/36-01	0.5457508-01	0001440	0.7072516-01	0.050/346-01	0.0120756-01	0.3437308-01
0001460	8.501621e-01	8.48/110e-01	8.503123e-01	8.54421/e-01	0001460	8.501621e-01	8.48/110e-01	8.503123e-01	8.54421/e-01	0001460	8.501621e-01	8.48/110e-01	8.503123e-01	8.54421/e-01
0001500	8.602384e-01	8.669221e-01	8.738110e-01	8.804019e-01	0001500	8.602384e-01	8.669221e-01	8.738110e-01	8.804019e-01	0001500	8.602384e-01	8.669221e-01	8.738110e-01	8.804019e-01
0001520	8.862449e-01	8.908526e-01	8.936885e-01	8,942116e-01	0001520	8.862449e-01	8.908526e-01	8.936885e-01	8.942116e-01	0001520	8.862449e-01	8.908526e-01	8.936885e-01	8.942116e-01
0001540	8 021280e-01	8 876287e-01	8 815761e-01	8 772960e-01	0001540	8 021280e-01	8 876287e-01	8 815761e-01	8 772960e-01	0001540	8 021280e-01	8 876287e-01	8 815761e-01	8 772960e-01
0001510	0.3212000-01	9.759390-01	0.0010/010-01	8.070552-01	0001510	0.3212000-01	9 759396- 01	0.00137010-01	8.070552-01	0001510	0.3212000-01	0.0702076-01	0.0010/010-01	8.070552-01
0001260	8.7644540-01	8.758586e-01	9.291192e-01	8.9795526-01	0001260	8.7644540-01	8.758586e-01	9.2911926-01	8.9795526-01	0001260	8.7644546-01	8.758586e-01	9.2911926-01	8.9795526-01
0001600	9.017450e-01	9.018401e-01	9.023741e-01	9.030874e-01	0001600	9.017450e-01	9.018401e-01	9.023741e-01	9.030874e-01	0001600	9.017450e-01	9.018401e-01	9.023741e-01	9.030874e-01
0001620	9.034536e-01	9.034900e-01	9.032703e-01	9.027722e-01	0001620	9.034536e-01	9.034900e-01	9.032703e-01	9.027722e-01	0001620	9.034536e-01	9.034900e-01	9.032703e-01	9.027722e-01
0001640	9 020746e-01	9 012363e-01	9 002426e-01	8 993018e-01	0001640	9 020746e-01	9 012363e-01	9 002426e-01	8 993018e-01	0001640	9 020746e-01	9 012363e-01	9 002426e-01	8 993018e-01
0001660	9 0947020 01	9 0720020 01	9 075091 01	8 071080a 01	0001660	9 0947020 01	9 0790020 01	9 07E091e 01	8 071080a 01	0001660	9 094702e 01	9 0790020 01	9 0750910 01	8 071080a 01
0001700	0.000705 01	0.0000000-01	0.073044 01	0.010000 01	0001700	0.000705 01	0.0000000-01	0.0730010-01	0.0100000 01	0001700	0.000705 01	0.0000000-01	0.073044 01	0.010000 01
0001700	8.968/256-01	8.9639366-01	8.9576440-01	8.949880e-01	0001700	8.968/25e-01	8.9639266-0T	8.9576440-01	8.9498800-01	0001700	8.968/250-01	8.9639266-01	8.9576440-01	8.9498806-01
0001720	8.940071e-01	8.925697e-01	8.903137e-01	8.867424e-01	0001720	8.940071e-01	8.925697e-01	8.903137e-01	8.867424e-01	0001720	8.940071e-01	8.925697e-01	8.903137e-01	8.867424e-01
0001740	8.814127e-01	8.743596e-01	8.660935e-01	8.575134e-01	0001740	8.814127e-01	8.743596e-01	8.660935e-01	8.575134e-01	0001740	8.814127e-01	8.743596e-01	8.660935e-01	8.575134e-01
0001760	8 4006666-01	8 446756e-01	8 4240540-01	8 4338100-01	0001760	8 4006666-01	8 4467560-01	8 4240540-01	8 4338100-01	0001760	8 4006666-01	8 4467560-01	8 4240540-01	8 4338100-01
0001/00	0.13300000 01	0.1107000 01	0.1210310 01	0.1000100 01	0001700	0.100000001	0.1107000 01	0.1210510 01	0.1000100 01	0002000	0.100000001	0.1107000 01	0.1210510 01	0.1000100 01
0002000	8.4/19010-01	8.550552e-01	8.000478e-01	8.073922e-01	0002000	8.4/1901e-01	8.550552e-01	8.600478e-01	8.0/3922e-01	0002000	8.4/1901e-01	8.550552e-01	8.0004/8e-01	8.673922e-01
0002020	8.745425e-01	8.811631e-01	8.869918e-01	8.916542e-01	0002020	8.745425e-01	8.811631e-01	8.869918e-01	8.916542e-01	0002020	8.745425e-01	8.811631e-01	8.869918e-01	8.916542e-01
0002040	8.945029e-01	8.947645e-01	8.918796e-01	8.860067e-01	0002040	8.945029e-01	8.947645e-01	8.918796e-01	8.860067e-01	0002040	8.945029e-01	8.947645e-01	8.918796e-01	8.860067e-01
0002060	8.800490e-01	8.766242e-01	8.745630e-01	9.277298e-01	0002060	8.800490e-01	8.766242e-01	8.745630e-01	9.277298e-01	0002060	8.800490e-01	8.766242e-01	8.745630e-01	9.277298e-01
0002100	8 0657530 01	0 0127380 01	0 0151320 01	0 0210350 01	0002100	8 0657530 01	0 0127380 01	0 0151320 01	0 0210350 01	0002100	8 0657530 01	0 0127380 01	0.0151320.01	0 0210350 01
0002100	0.000450	0.0012/300-01	0.0101020-01	9.0219336-01	0002100	0.000450	0.0012/300-01	0.0101020-01	0.0219332-01	0002100	0.000450	0.0012/300-01	0.0101020-01	0.0219336-01
0002120	9.029458e-01	9.031856e-01	9.029956e-01	9.025406e-01	0002120	9.029458e-01	9.031856e-01	9.029956e-01	9.025406e-01	0002120	9.029458e-01	9.031856e-01	9.029956e-01	9.025406e-01
0002140	9.018729e-01	9.010967e-01	9.002551e-01	8.993015e-01	0002140	9.018729e-01	9.010967e-01	9.002551e-01	8.993015e-01	0002140	9.018729e-01	9.010967e-01	9.002551e-01	8.993015e-01
0002160	8.984088e-01	8.976101e-01	8.970267e-01	8.965970e-01	0002160	8.984088e-01	8.976101e-01	8.970267e-01	8.965970e-01	0002160	8.984088e-01	8.976101e-01	8.970267e-01	8.965970e-01
0002200	8.961960e-01	8.957418e-01	8.951184e-01	8.943413e-01	0002200	8.961960e-01	8.957418e-01	8 951184e-01	8.943413e-01	0002200	8 961960e-01	8 957418e-01	8.951184e-01	8.943413e-01
0002220	8 0244700 01	8 0241270 01	8 0101250 01	0 0007720 01	0002220	8 0244700 01	8 02/1270 01	8 0101250 01	0 0007720 01	0002220	8 0244700 01	8 02/1270 01	8 0101250 01	0 0007720 01
0002220	0.9544/90-01	0.9241270-01	0.9101250-01	0.000//Se-01	0002220	0.9544/90-01	0.92412/e-01	0.9101250-01	0.000//Se-01	0002220	0.9544/90-01	0.9241270-01	0.9101250-01	0.000//Se-01
0002240	8.854491e-01	8.801817e-01	8.729977e-01	8.643330e-01	0002240	8.854491e-01	8.801817e-01	8.729977e-01	8.643330e-01	0002240	8.854491e-01	8.801817e-01	8.729977e-01	8.643330e-01
0002260	8.550685e-01	8.465843e-01	8.402100e-01	8.368796e-01	0002260	8.550685e-01	8.465843e-01	8.402100e-01	8.368796e-01	0002260	8.550685e-01	8.465843e-01	8.402100e-01	8.368796e-01
0002300	8.370128e-01	8.403541e-01	8.461742e-01	8.534718e-01	0002300	8.370128e-01	8.403541e-01	8.461742e-01	8.534718e-01	0002300	8.370128e-01	8.403541e-01	8.461742e-01	8.534718e-01
0002320	8 6120300 01	8 6802270-01	8 7508240 01	8 8238420-01	0002320	8 6120300-01	8 6802270 01	8 7508240-01	8 8238420-01	0002320	8 6120300 01	8 6802270-01	8 7508240 01	8 8238420 01

• Visualization - why ?

The world is full of information. Simulations, experiments and data collections comprise an enormous and permanently increasing accumulation of data. Therefore new ways have to be found to reveal the information hidden in sometimes huge data sets.

Visualization offers a way. It aims at presenting complex information in a comprehensible way - exploiting the sensory apparatus and the highly developed perceptual capabilities of humans.

• Terminology

Visualization. Scientific visualization (science, engineering). Data Visualization (wider understanding). Information visualization (visualize abstract information)

En mécanique des fluides

Production des données par :

- Expériences : LDA, PIV, DPIV...
- Calculs : simulations numériques.
 Simulation Numérique Directe, codes de calcul Navier-Stokes moyennés, modèles...
 - Données structurées (différences finies, méthodes spectrales), non structurées (volumes finis, éléments finis)

Exploitation \Rightarrow Copmrendre la **physique** !

Aéronautique (portance, traînée) ; structures (interaction fluides/structures) ; phénoménologie de la turbulence ; Environnement (atmosphère, océans) Vision Eulérienne \neq vision Lagrangienne.

Maillages : structuré/non structuré





Figure 3.3: mesh with hole



www.opendx.org

- OpenDX is the open source software version of IBM's Visualization Data Explorer Product.
- Visualization for anything from examining simple data sets to analyzing complex, time-dependent data from disparate source ; **sophisticated data model**
- Build visualization applications for your end users ; functional modules
- Advanced Execution Environment : distributed processing
- Client/Server architecture











 $\overline{\mathbf{v}}$



www.ilight.com

PLOT3D Data Input *	
FILE FORMAT Formatted Unformatted	Grid Subset Selection
DATA TYPE A XYZ Q COORDS 2 2-D DATA FORMAT Multi-Grid IBlanks IBlanks Merge Series Merge Series	Selected Grids (Total Available) 5 (5) Selected Points (Total Available) 1250682 (1250682) Grid (Dimension) 1 (49 x 37 x 69) 2 (201 x 57 x 69) 3 (201 x 9 x 15)
/elsa/Mercure/*	5 (109 x 37 x 69)
Directories Files	
/elsa/Mercure/. △ rotor1_h1_CV.res rotor1_h4_CC.res rotor1_h4_CV.res rotor1_h5_CC.res rotor1_h5_CV.res rotor1_newmai2_fv.le rotor1_o2_CC.res rotor1_o2_CV.res rotor1_o3_CC.res △	
Selection	Select All Deselect All
Working Filter Exit	

×	Computational Surface		So-Surface				
ACTION Create Clear All	SURFACE SELECTION Total Surfaces: 1	SURFACE TYPE	ACTION Create Clear All	SURFACE SELECTION Total Surfaces: 1	SURFACE TYPE Competities Scalar		
Delete	GRID SELECTION Total Grids: 5	Vector Vector Params	Delete	SUBSET	Vector Vector Vector Params		
Image: Current: 2 Min: 1	4 Inc: <u>1</u>	Max: [49	Cutting Plane]			
Urrent:]]		Max: 37	Min: 339.8 Value: 339.8 Max: 339.8 Steps: 2				
□ K Current: ja<	3 Inc: j1	Max: 69	THRESHOLDING	SWEEP CONTROL			
☐ THRESHOLDING	Max: ĭ1	SWEEP CONTROL		Value 0			
TRANSPARENCY TRANSPARENCY DISPLAY TYPE Mesh Surface Probe	Value: 0	Visibility Show Mesh Contours: None Exit	DISPLAY TYPE Constant Shadin	g = LINE TYPE Thin =	Show Mesh Contours:		



Streamlines, particle paths, Core detection, ...

Extrait de la documentation Fieldview

"Automatic Feature Detection algorithms process CFD results data to locate flow features such as vortex cores, separation and re-attachment lines and shock surfaces. Until now, these features would be located using indirect methods that relied heavily on the fluid mechanics knowledge of the user."

Autres logiciels utilisés

- Amira
- Tecplot
- Fluent

Critères de visualisation en mécanique des fluides

- \Rightarrow On voit ce que l'on veut voir !
 - Visualisation directe des champs de vitesse, vorticité, pression...
 - La visualisation de tourbillons passe par la définition même de ce qu'est un tourbillon ou une structure cohérente et ce problème est encore ouvert à ce jour.

Visualisation des tourbillons : divers critères

Il sont basés sur le comportement de quantités physiques au centre et autour des tourbillons.

- Diverses observations ont mené à ces critères. Par exemple, le critère de basse pression au centre des tourbillons se justifie uniquement dans le cas d'écoulement plans stationnaires.
- Une définition intuitive du tourbillon comme un tube dont la surface est composée de lignes de vorticité conduit à calculer la vorticité et à rechercher ses extrema. Cette technique est très efficace dans la limite d'écoulements relativement homogènes car la détection des tourbillons est tributaire du seuillage du niveau de vorticité choisi.
- Proposé pour les écoulements 2D, le critère de Weiss, qui consiste à rechercher le minimum du laplacien de pression, a démontré son efficacité mais n'est pas applicable aux résultats tridimensionnels.

Reste donc à trouver un moyen robuste de repérer des tourbillons tridimensionnels dans un écoulement fortement inhomogène.

- Arguments dynamiques : critères de pression
- Arguments topologiques : critères Q, R, discriminant, λ_2
- Arguments cinématiques : critère NAM

Critère de pression

Les particules fluides au sein d'un tourbillon sont en équilibre si

$$\partial_t \boldsymbol{u} + \boldsymbol{\omega} imes \boldsymbol{u} = -rac{1}{
ho} \boldsymbol{\nabla} P$$

La pression dynamique doit décroître dans le tourbillon pour contrebalancer les effets centrifuges.

Le coeur d'un tourbillon correspond ainsi à un minimum local de pression.

Les surfaces iso-pression peuvent donc être utilisées.

Critères Q, R, discriminant, λ_2

(Chong et Perry, 1990 ; Dubief et Delcayre, 2000) En supposant que le champ de vitesse se comporte "bien" partout, on peut développer localement en chaque point de l'écoulement le champs de vitesse en série de Taylor :

$$u_i = \dot{x}_i = A_i + A_{ij}x_j + A_{ijk}x_jx_k + \cdots$$

Les coefficients dépendent du temps si l'écoulement est instationnaire.

En re-centrant le repère local au point considéré, on peut récrire au premier ordre la caractérisation topologique de l'écoulement sous la forme :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}$$

Les coefficients $a_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ sont donc les éléments du tenseur des déformations, qui se décompose en parties symmétriques et antisymmétriques :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = S_{ij} + R_{ij}.$$

On identifie les valeurs propres λ_1 , λ_2 , λ_3 de A et les vecteurs propres, et l'on étudie la topologie du point considéré dans le repère des éléments propres. L'équation caractéristique

$$\lambda^3 + P\lambda^2 + Q\lambda + R = 0$$

introduit trois quantités :

$$P_{ij} = -S_{ii} = -\operatorname{tr}(\mathsf{A}) \qquad Q = \frac{1}{2} \left(P^2 - \operatorname{tr}(\mathsf{A}^2) \right) \qquad R = -\det(\mathsf{A})$$

et l'on peut relier la structure locale de l'écoulement aux valeurs de Q et R. (Diagramme dans le plan Q-R.)

• Critère $Q = \frac{1}{4}(\omega^2 - S_{ij}S_{ij})$ (critère de Weiss) :

Q < 0 sont des régions à cisaillement dominant

Q > 0 sont les régions à vorticité dominante (tourbillons ?..)

(Lien entre les tourbillons cohérents et les régions convexes à $\nabla^2 P > 0 \Rightarrow$ Critère de M. Larchevêque, bi-dimensionnel.)

• Critère du discriminant
$$\Delta = \left(\frac{Q}{3}\right)^3 + \frac{R}{2} > 0$$

Critère NAM : Moment Angulaire Normé

Méthode d'abord mise au point pour le post-traitement de données expérimentales bruitées, ce qui limitait sérieusement la capacité du critère de la vorticité à repérer les tourbillons (Michard, LMFA, 1997).

Défi nition du N.A.M.

Outil basé sur des propriétés géométriques simples du tourbillon.

Pour la première fois appliqué à des mesures P.I.V. ("Particle Image Velocimetry"). Le but de l'expérience, menée par Michard et al. est de localiser le centre d'un tourbillon dans une chambre de moteur.

Pour introduire la fonction utilisée, appelée Moment Angulaire Normé (noté N.A.M.), considérons tout d'abord un tourbillon bidimensionnel. L'idée de base est de constater que, dans ce cas, les lignes de courant sont fermées au voisinage du centre du tourbillon si l'on se place dans le repère se déplaçant avec le tourbillon.



Figure 1: Schéma du calcul du moment angulaire normé.

Sur la figure 1, r et α désignent respectivement le rayon vecteur et l'angle entre r et la vitesse u prise au point M. Soit P un point à l'intérieur du tourbillon. Si M se déplace le long d'une ligne de courant, la fonction $\sin \alpha$, qui est la valeur algébrique du produit vectoriel $r \times u$ normé, garde toujours le même signe. Sa valeur moyenne est soit positive soit négative suivant le sens de rotation du tourbillon mais non nulle. Cette valeur tend vers zéro en dehors du tourbillon.

On généralise cette idée pour un écoulement tridimensionnel en définissant la fonction f comme :

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_p) = \frac{1}{V} \int_{\boldsymbol{x} \in V} \frac{(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_p) \times \boldsymbol{u}(\boldsymbol{x})}{|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_p| |\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x})|} d\boldsymbol{x}$$
(1)

Dans les cas d'**écoulements bidimensionnels** et des mesures expérimentales se faisant dans des plans, seule la composante perpendiculaire au plan de l'écoulement ou au plan de mesure est non nulle et est donc utilisée pour localiser les tourbillons. Le signe de cette composante donnera le sens de rotation des tourbillons repérés ; nous noterons cette fonction f_{2D} .

Dans le cas d'**écoulements tridimensionnels**, il y a deux cas de figure. Si l'on connaît a priori l'orientation privilégiée des tourbillons (par exemple pour les "streaks" dans les écoulements en canal) on peut ne calculer que la composante du moment angulaire normé concernée. Si l'on ne sait rien de l'écoulement, en revanche, alors le calcul de la norme du N.A.M. s'impose avec perte d'information sur le sens de rotation du tourbillon. On notera cette fonction f_{3D} . Dans la pratique, les champs de vitesse sont bien sûr discrêts et l'on n'utilise pas directement l'équation 1. La définition suivante est adoptée :

$$f(P) = \frac{1}{(2N+1)^3 - 1} \sum_{i} \frac{r_i \times u(M_i)}{|r_i| |u(M_i)|}.$$
 (2)

Ici, le point P parcourt tout le domaine de calcul mais le N.A.M. est calculé sur un nombre restreint de points autour de ce point. On définit N comme le nombre de "couches" de points constituant le domaine restreint ; il y a donc $(2N + 1)^3 - 1$ points dans ce domaine (on exclut le point P où la fonction présente une singularité). La figure 2 montre un exemple de sous domaine à quatre couches.



Figure 2: Illustration du domaine de calcul discrêt et réduit du moment angulaire normé. Ici, N = 4. Turbulence homogène

Calculs de Lukas Liechtenstein (2005)

Rotating stratified turbulence

DNS, Res: 256^3 , $Re_\lambda \approx 150$

STRATIFIED

 $2\Omega = N$

Brunt-Vaisala Frequency ${\cal N}$

 $\alpha < 1$

$$\alpha = \frac{2\Omega}{N} = 1$$

ROTATING Vertical System Rotation Ω

$$\alpha > 1$$



Boussinesq approximation

Divergence free Navier-Stokes with body forces

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} - \frac{1}{Re} \nabla^2 \boldsymbol{u} = -\nabla (p^* + \frac{1}{2}\boldsymbol{u}^2) + \boldsymbol{u} \times \nabla \times \boldsymbol{u} - 2\Omega \,\boldsymbol{n}_3 \times \boldsymbol{u} - \boldsymbol{b} \,\boldsymbol{n}_3$$
$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0$$

Equation for density fluctuations

$$\frac{\partial b}{\partial t} - \kappa \nabla^2 b = -(\boldsymbol{u} \times \nabla) \cdot b + N^2 (\boldsymbol{n}_3 \cdot \boldsymbol{u})$$

⇒ Méthode de projection sur une base de polynômes de Fourier (pseudo-spectrale, DNS). Résolution courante $512^3 = = 134$ millions de points ! (×*N* champs) Calculs sur supercalculateur Nec SX6. Visualisations sur bi-opteron (8Go de RAM pour voir 256^3 ...)





Oscillating Mechanisms

DNS, Res: 256^3 , $Re_\lambda \approx 150$



Dispersion relation:
$$\sigma = \sqrt{N^2 \sin^2 heta + (2\Omega)^2 \cos^2 heta}$$

Statistics: Angular Spectra








37-a





38-a

Statistics: Anisotropy in velocity correlations



2 $\alpha = 0$ $\alpha = 0.1$ $\alpha = 10$ r_{z}^{xnxn} DNS $\boldsymbol{\alpha}$ 1 0.5 0 $time^{20}$ 5 10 15 0

Horizontal correlation of horizontal velocity: Vertical correlation of horizontal velocity:

$$L_{u_{x}u_{x}}^{x}(t) = L_{u_{x}u_{x}}^{z}(t) = L_{u_{x}u_{x}}^{z}(t) = \left\langle \int_{-L/2}^{L/2} e^{-ik_{x}x} u_{x}^{2}(x,k_{y},k_{z}) dx \right\rangle_{k_{x}=0} \left\langle \int_{-L/2}^{L/2} e^{-ik_{z}z} u_{x}^{2}(k_{x},k_{y},z) dz \right\rangle_{k_{z}=0}$$









$$t_{N/2\pi}=20$$
, $t_{\Omega/\pi}=2$





 $t_{N/2\pi} = 20, t_{\Omega/\pi} = 2$ $t_{N/2\pi} = 40, t_{\Omega/\pi} = 4$







$$t_{N/2\pi} = 20, t_{\Omega/\pi} = 2$$
 $t_{N/2\pi} = 40, t_{\Omega/\pi} = 4$



$$t_{N/2\pi} = 60, t_{\Omega/\pi} = 6$$







$t_{N/2\pi} = 20, t_{\Omega/\pi} = 2$ $t_{N/2\pi} = 40, t_{\Omega/\pi} = 4$





40-d

 $t_{N/2\pi} = 60, t_{\Omega/\pi} = 6$ $t_{N/2\pi} = 80, t_{\Omega/\pi} = 8$







$t_{N/2\pi} = 20, t_{\Omega/\pi} = 2$ $t_{N/2\pi} = 40, t_{\Omega/\pi} = 4$



 $t_{N/2\pi} = 60, t_{\Omega/\pi} = 6$ $t_{N/2\pi} = 80, t_{\Omega/\pi} = 8$ $t_{N/2\pi} = 100, t_{\Omega/\pi} = 10$









$$t_{N/2\pi} = 2, t_{\Omega/\pi} = 20$$





 $t_{N/2\pi} = 2, t_{\Omega/\pi} = 20$ $t_{N/2\pi} = 4, t_{\Omega/\pi} = 40$









$$t_{N/2\pi} = 6, t_{\Omega/\pi} = 60$$











 $t_{N/2\pi} = 6, t_{\Omega/\pi} = 60$ $t_{N/2\pi} = 8, t_{\Omega/\pi} = 80$

41-d







 $t_{N/2\pi} = 4, t_{\Omega/\pi} = 40$







 $t_{N/2\pi} = 6, t_{\Omega/\pi} = 60$ $t_{N/2\pi} = 8, t_{\Omega/\pi} = 80$ $t_{N/2\pi} = 10, t_{\Omega/\pi} = 100$

41-е





























Fieldview's automatic vortex cores detection




















Trajectoires tridimensionnelles des particules fluides

Définies par :

$$\frac{d\boldsymbol{x}}{dt} = \boldsymbol{u}$$

différentes des lignes de courant en général.

Visualisation des lignes de courant dans une "boite" de turbulence stratifiée. f2.mpg

Turbulence inhomogène

Turbulence diffusive en rotation entre deux parois planes

Lionel Lollini, 1998



Figure 3: Cyclonic activity over the North Atlantic Ocean area in 1995. The four cyclones were christened Humberto, Iris, Karen and Luis (Source Météo-France).



Figure 4: Sketch of the numerical experiment geometry used for generating the inertial waves.



Figure 5: Dynamics of inertial waves. Dashes indicate lines of constant phase, aligned with the group velocity of the waves, and the velocity vector.



Figure 6: Two-dimensional plot of the lines of constant phase for the inertial waves (the wavevector is orthogonal to these lines).



Figure 7: Photograph in the experiment by McEwan. The tank is cylindrical, with its axis aligned to the axis of rotation.



Figure 8: (a) Three-dimensional plot of the velocity field in the case $2\Omega/n = 1.33$. (b) Closer view of the velocity field for this very case, in a (y,z) plane away from the grid. The rotation of the velocity vector (phase change) can be observed along the radial directions.



Figure 9: Velocity field in a plane of the simulation NRH at $t/\tau(0) = 20$, showing that only large scale variability remains in the fbw after such a long decay.



Figure 10: Velocity fi eld for simulation NRI at $t/\tau(0) \approx 90$, (a) in an inhomogeneous (vertical) plane; (b) in a homogeneous (horizontal) plane



Figure 11: Scheme of the computational domain in the numerical experiment of rotating forced turbulence. The grid is located closer to the bottom wall, as in the experiment by Hopfi nger, Browand and Gagne.



Figure 12: Correlation between vertical components of velocity and vorticity; (a) close to the bottom wall for run NRI; (b) close to the upper wall for run NRI; (c) close to the bottom wall for run RI; (d) close to the upper wall for run RI.



Figure 13: Plot of the velocity field at fixed Rossby number Ro = 0.25 with variable Reynolds number. 79



Figure 14: Plot of the velocity field at fixed Reynolds number Re = 100 and variable Rossby number.







Figure 15: Qualitative comparisons between fb visualisation in (a) the experiment by Hopfi nger,



82 Figure 16: Close view of two structures identified using the NAM criterion in run R3 close to



Figure 17: (a) materialisation of three vortices by particle paths computed in the instantaneous velocity field. The central vortex is cyclonic. (b) regions of the fbw identified by the 83 behaviour of particle paths for run R3 (the view is projected onto a vertical plane).



Figure 18: For run R3: (a) plot of the velocity field in a horizontal plane, and of the threedimensional structures identified with the N.A.M. criterion. (b) of iso-lines of vertical vorticity and three-dimensional structures identified by the N.A.M. criterion.



Figure 19: Isolated cyclonic vortex obtained iggun R50. The entire computational domain be-



Faouzi Laadhari (LMFA), 2003–2005

• Critère de pression linéaire





R+=1000



R+=1000

• Critère de pression non linéaire



90



• Critère du **discriminant** [-0.00001;0.00005]





• Critère q [-0.02;0.02;-0.03;0.03]








• Critère *r* [-0.002;0.002]





• Vitesse longitudinale fluctuante



• Enstrophie



R+=1000 385x512x512 t=143





• Visualisation "volumique" (Amira)



- Animation : animvorth+=1000b.miff
 longitudinale [perspective]
- Animation : animvorth+=1000_end.miff

canal plan turbulent : vorticité

[vue de bout arrière]

104

- Animation : animvorth+=1000front.miff [vue de bout avant]
- Animation : coutourb 3 sim 6pi nam v3d u neg 0 159.miff canal plan $L = 6\pi$ "transitionnel" : fluctuations < 0 de vitesse longitudinal longitudinal
- Animation : coutourb 3 sim 6pi nam v3d u pos 0 159.miff canal plan $L = 6\pi$ "transitionnel" : fluctuations > 0 de vit. longitudinal canal
- Animation : coutourb 3 sym 3pi nam u neg v3d.miff canal plan $L = 3\Pi$ "transitionnel" : fluctuations négatives de vit. longitudinal longitudinal

Écoulement de Couette

Étude expérimentale par Stéphane Amalfi et Faouzi Laadhari (LMFA), 2002–2005.







Étude et modélisation de l'écoulement sur les aubages

de la roue mobile du compresseur dans le concept MTFD3

Fabien Godeferd et Pascale Kulisa (2004)

Géométrie périodique. Maillage structuré.

1 Maillage

La géométrie d'un canal est représentée sur la fi gure 20, l'axe x étant l'axe de rotation de la roue mobile du compresseur. La périodicité permet de reconstituer la roue complète, qui comporte 34 aubages. Une portion de la roue à quatre aubages est représentée sur la fi gure 21.

Le maillage est de type multiblocs HOH, à points coï ncidants. Le premier domaine de calcul h1,à gauche sur la fi gure20, contient un maillage structuré classique en H (fi gure23). Puis, en se déplaçant vers l'aval, le domaine o2 autour de l'aubage lui-même est maillé en O (fi gure22), et enfi n le domaine de sortie h5 est maillé en H (fi gure24). La seule partie mobile est le domaine autour de l'aubage, les zones d'entrée et de sortie représentant respectivement la sortie du stator de l'étage compresseur, et la sortie de l'étage complet vers l'aval de la turbomachine.

Outre ces deux domaines, des contraintes de calcul rendent nécessaires l'introduction d'un maillage en H dans un domaine en O pour la zone de jeu (fi gures 25 et 26 respectivement).

Le maillage complet est constitué de cinq domaines qui totalisent 1 250 682 noeuds. Le détail des résolutions pour chacun des domaines est donné dans le tableau 1.

Domaine	N_i	N_{j}	N_k	Zone
h1	49	37	69	H amont
o2	201	57	69	O aubage
о3	201	9	15	jeu
h4	76	26	15	jeu
h5	109	37	69	H aval

 Table 1: Nombre de points pour chacun des domaines du maillage.

Géométrie et maillage















Résultats : Nombre de Mach



 \sim









MTF3 Jeu en Tete - Mach relatif





Vitesse : recirculation ?



Figure 20. Neach and Mean relatified the annual suite and allow the plan relation is relation.





weakly nonlinear at asymptotically high rotation rate

Resonant surfaces

• Triads which satisfy the resonance conditions:

$$k+p+q=0$$

$$F_{\epsilon\epsilon'\epsilon''}(\boldsymbol{k},\boldsymbol{p},\boldsymbol{q}) = \epsilon\sigma(\boldsymbol{k}) + \epsilon'\sigma(\boldsymbol{p}) + \epsilon''\sigma(\boldsymbol{q}) = 0$$

which defines complex *resonant surfaces* $S_{\epsilon'\epsilon''}$

• The remaining triads with k + p + q = 0 but $F_{\epsilon\epsilon'\epsilon''}(k, p, q) \neq 0$, in the 3D spectral space.

Energy equation $e(k, \theta)$:

$$\frac{\partial \boldsymbol{e}}{\partial t} + 2\nu k^2 \boldsymbol{e} = \sum_{\boldsymbol{\epsilon}' \boldsymbol{\epsilon}''} \int_{S_{\boldsymbol{\epsilon}' \boldsymbol{\epsilon}''}} \frac{g_{\boldsymbol{\epsilon}' \boldsymbol{\epsilon}''}(\boldsymbol{k}, \boldsymbol{p}, \boldsymbol{q})}{\boldsymbol{\alpha}_{\boldsymbol{\epsilon}' \boldsymbol{\epsilon}''}(\boldsymbol{p}, \boldsymbol{q})} \boldsymbol{e}(\boldsymbol{p}, t) \left[\boldsymbol{e}(\boldsymbol{q}, t) - \boldsymbol{e}(\boldsymbol{k}, t)\right] d^2 \boldsymbol{p}$$
$$\boldsymbol{\alpha}_{\boldsymbol{\epsilon}' \boldsymbol{\epsilon}''}(\boldsymbol{p}, \boldsymbol{q}) = \frac{1}{\pi} \left|\boldsymbol{\epsilon}' \boldsymbol{c}_g(\boldsymbol{p}) - \boldsymbol{\epsilon}'' \boldsymbol{c}_g(\boldsymbol{q})\right|$$



Cut trough the resonant surface for k = 1 et $\theta_k = 1.3$
Numerical resolution



- Spherical discretisation of spectral space: Typical resolution $400 \times 400 \times 400$
- Compute intersection of resonant surface with each grid cell ⇒ elementary area and integration geometrical coefficients
- 3D interpolation of spectrum for $oldsymbol{q}$



$$\widehat{(k,\Omega)} = \theta = 0.85$$

 $\theta = 1.49$

Animation1Animation2