ENSAM Bordeaux – mars 2020

Calcul Scientifique avec

python™ 3

- ▷ Introduction - Prise en main
- ▷ Les bases du langage Python
- ▷ I/O fichiers ASCII, tracés de courbes
- ► Les modules Numpy et Scipy
- ▷ Conception/programmation OO

Jean-Luc Charles - Éric Ducasse

Arts & Métiers, I2M

Arts et Métiers Sciences et Technologies

I2M Bordeaux

- Python ne propose de base que le type list, conteneur dynamique hétérogène puissant, mais pas orienté calcul numérique.
- Le module **numpy** propose un ensemble de classes, d'objets et de fonctions dédiés aux calculs numériques.
- Le module **scipy** utilise **numpy** pour proposer une "boîte" à outil de calcul scientifique très complète.
- L'utilisation des modules numériques et de tracé (**numpy**, **scipy** et **matplolib**) avec l'IDE **spyder** fournit une solution puissante pour le calcul scientifique.
- Les docs complètes *Numpy Reference Guide*, *Numpy User Guide* et *Scipy Reference Guide* sont sur http://docs.scipy.org/doc/

- Le module **numpy** propose un ensemble de classes, d'objets et de fonctions dédiés aux calculs numériques :
  - classe **ndarray** (*N dimensional array*) : tableaux homogènes multi-dimensionnels ;
  - **numpy.linalg** : un module d'algèbre linéaire basique ;
  - **numpy.random** : un module pour les générateurs aléatoires, ;
  - **numpy.fft** : un module basique de calculs FFT (*Fast Fourier Transform*).
- Le site web **numpy** est www.numpy.org.
  La doc en ligne de **numpy** est docs.scipy.org/doc/numpy/reference/.
  - NumPy for MATLAB© Users : wiki.scipy.org/NumPy_for_Matlab_Users

La classe ndarray

- Création d'objets `ndarray` :

```
>>> import numpy as np
>>> m1 = np.ndarray((2,2))   # float par défaut
>>> m1                       #m1 pas initialisée par défaut!
array([[  0.00000000e+000,   4.94944794e+173],
       [  1.93390228e-309,   4.43736710e-317]])
>>> m2 = np.ndarray((2,2), dtype=int) # dtype: float, int bool...
>>> m2
array([[140206981547944,        48604000],
       [        8981312,        50321888]])
```

- La fonction `array` convertit un objet `list` en objet `ndarray` :

```
>>> m1 = np.array([1, 2, 3]) ; m1
array([1, 2, 3])
>>> m2 = np.array([1, 2, 3], float) ; m2 # float, int bool...
array([ 1.,  2.,  3.])
>>> L2 = [4, 5, 6]
>>> m3 = np.array([[1, 2, 3],[4, 5, 6]]) ; m3 # liste de listes : matrice
array([[1, 2, 3],
       [4, 5, 6]])
```

La classe ndarray

- Les fonctions numpy `zeros` et `ones`

```
>>> m1 = np.zeros(4) ; m1      # float par défaut
array([ 0.,  0.,  0.,  0.])
>>> m2 = np.ones(3, bool) ; m2
array([ True True True])
>>> m3 = np.ones((2,3),int) ; m3
array([[1, 1, 1],
       [1, 1, 1]])
```

- Les fonctions `linspace`, `logspace` créent des vecteurs de `float` :

```
>>> np.linspace(0, 10, 5)      # start, stop, number of points
array([ 0., 2.5, 5., 7.5, 10.])
>>> np.logspace(1, 2, 4)  # 4 points between 10**1 and 10**2
array([ 10., 21.5443469, 46.41588834, 100.])
>>> np.logspace(1, 2, 4, base=2)  # 4 points between 2**1 and 2**2
array([ 2. , 2.5198421, 3.1748021, 4.])
```

La classe ndarray

- Les fonctions numpy `eye` et `identity` :

```
>>> np.eye(3)
array([[ 1.,  0.,  0.],
       [ 0.,  1.,  0.],
       [ 0.,  0.,  1.]])
>>> np.eye(3,k=1)
array([[ 0.,  1.,  0.],
       [ 0.,  0.,  1.],
       [ 0.,  0.,  0.]])
>>> np.eye(3,k=-1)
array([[ 0.,  0.,  0.],
       [ 1.,  0.,  0.],
       [ 0.,  1.,  0.]])
>>> np.identity(3)
array([[ 1.,  0.,  0.],
       [ 0.,  1.,  0.],
       [ 0.,  0.,  1.]])
```

La classe ndarray

Copies et références d'objets ndarray

```
>>> m2 = np.array([[ 1., 2., 3.],[ 4., 5., 6.]])
```

```
>>> m3 = m2
>>> id(m2), id(m3), m2 is m3
array(20263504, 20263504, True)
>>> m3[1,1] = -1. ; m3
array([[  1.   2.   3.]
       [  4.  -1.   6.]])
>>> m2
array([[  1.   2.   3.]
       [  4.  -1.   6.]])
>>> m4 = m2.copy()
>>> id(m2), id(m4), m4 is m2
(20263504, 21073360, False)
>>> m4[1,1] = -2. ; m4
array([[  1.   2.   3.]
       [  4. -2.   6.]])
>>> m2
array([[  1.   2.   3.]
       [  4.  -1.   6.]])
```

- L'affectation de m3 par l'opérateur = crée une **référence** sur m2, pas une **copie** de m2

- Il faut utiliser explicitement la méthode copie de la classe ndarray pour obtenir une copie (*deep copy*)

La classe ndarray

- Les attributs de la classe ndarray :

```
>>> m3 = np.array([[1, 2, 3],[4, 5, 6]])   # list of lists gives matrix
>>> m3
array([[1 2 3]
       [4 5 6]])
>>> m.dtype         # the element type
dtype('int64')
>>> m.shape         # the length of the array along each dimension
(2, 3)             # 2 lines, 3 columns
>>> m.itemsize     # the element size in bytes element type
8                  # integer of 8 bytes (64 bits)
>>> m.size          # the number of elements
6
>>> m.ndim          # the number dimensions (axes)
2
>>> m.nbytes        # the number of bytes used by array data
48                 # 6 elements of 8 bytes each
```

La classe ndarray

- La méthode `tolist` crée un objet `list`, copie de l'objet ndarray :

```
>>> m3.tolist()
[[1, 2, 3], [4, 5, 6]]
>>> L1 = m3.tolist()
>>> type(L1)
<class 'list'>
```

- La méthode `copy` permet de copier (*deep copy*) un objet ndarray :

```
>>> c = m.copy()
>>> c
array([[1 2 3]
       [4 5 6]])
>>> id(m), id(c), c is m
(51720800, 69723584, False)
```

La classe ndarray

- Opérations élémentaires avec les ndarray :

```
>>> a, b = np.array([1, 2, 3, 4]), np.array([2, 3, 4, 5])
>>> a+b
array([3, 5, 7, 9])
>>> a-b
array([-1, -1, -1, -1])
>>> a**2
array([ 1,  4,  9, 16])
>>> 4*a, a*4
(array([ 4,  8, 12, 16]), array([ 4,  8, 12, 16]))
>>> a*b
array([ 2,  6, 12, 20])
>>> A=np.array([a,b])
>>> A
array([[1, 2, 3, 4],
       [2, 3, 4, 5]])
>>> A*A  # * fait une multiplication terme à terme
array([[ 1,  4,  9, 16],
       [ 4,  9, 16, 25]])
```

La classe ndarray

- Opérations élémentaires avec les ndarray :

```
>>> a < 3
array([ True,  True, False, False], dtype=bool)
>>> a <= 3
array([ True,  True,  True, False], dtype=bool)
>>> a==2
array([False,  True, False, False], dtype=bool)
>>> a <= 3
array([ True,  True,  True, False], dtype=bool)
>>> (a <= 3).all()
False
>>> (a <= 3).any()
True
>>> yes, no = np.ones_like(a), np.zeros_like(a)
>>> yes, no
(array([1, 1, 1, 1]), array([0, 0, 0, 0]))
>>> np.where(a % 3 == 0, yes, no)
array([0, 0, 1, 0])
```

La classe ndarray

- Méthodes utiles de la classe ndarray :

```
>>> m = np.linspace(1,12,12).reshape((3,4)); m
array([[  1.   2.   3.   4.]
       [  5.   6.   7.   8.]
       [  9.  10.  11.  12.]])
>>> m.sum(), m.min(), m.max()      # somme, max, min de tous les éléments
(78.0, 1.0, 12.)
>>> m.sum(axis=0)                  # somme des lignes
array([ 15.,  18.,  21.,  24.])
>>> m.min(axis=0)                  # min des lignes
array([ 1.,  2.,  3.,  4.])
>>> m.cumsum(axis=0)               # somme cumulée des lignes
array([[  1.,   2.,   3.,   4.],
       [  6.,   8.,  10.,  12.],
       [ 15.,  18.,  21.,  24.]])
>>> m.cumsum(axis=1)                  # somme cumulée des colonnes
array([[  1.,   3.,   6.,  10.],
       [  5.,  11.,  18.,  26.],
       [  9.,  19.,  30.,  42.]])
```

Les Ufunction (*Universal functions*)

- Les ufunc sont des fonctions mathématiques courantes (sin, cos, exp...) :
  - ▷ qui s'appliquent à tous les éléments d'un objet ndarray ;
  - ▷ qui renvoient l'objet ndarray résultant.

```
>>> m = np.linspace(1,6,6).reshape((2,3)); m
array([[ 1.  2.  3.]
       [ 4.  5.  6.]])
>>> s = np.sqrt(m); s
array([[ 1.        ,  1.41421356,  1.73205081],
       [ 2.        ,  2.23606798,  2.44948974]])
>>> np.exp(m)
array([[   2.71828183,    7.3890561 ,   20.08553692],
       [  54.59815003,  148.4131591 ,  403.42879349]])
>>> m = np.linspace(30,180,6).reshape((2,3)); m
array([[  30.   60.   90.]
       [ 120.  150.  180.]])
>>> np.radians(m)
array([[ 0.52359878,  1.04719755,  1.57079633],
       [ 2.0943951 ,  2.61799388,  3.14159265]])
>>> np.cos(np.radians(m))
array([[  8.66025404e-01,   5.00000000e-01,   6.12323400e-17],
       [ -5.00000000e-01,  -8.66025404e-01,  -1.00000000e+00]])
```

Algébre linéaire avec numpy et numpy.linalg

- La doc en ligne du module numpy.linalg est sur http://docs.scipy.org/doc/numpy/reference/routines.linalg.html
- Quelques exemples :
  - np.dot multiplication matricielle
  - np.vdot produit scalaire de 2 vecteurs
  - np.diag création matrice diagonale
  - np.transpose matrice transposée
  - np.linalg.det déterminant de la matrice
  - np.linalg.inv inverse de la matrice
  - np.linalg.solve résolution du sytème linéaire A x = B
  - np.linalg.eig valeurs propres, vecteurs propres
  - np.linalg.eigvals valeurs propres

Algébre linéaire avec numpy et le module numpy.linalg

- Produit terme à terme et produit matriciel :

  `R = np.dot(A, B)` $\leftrightsquigarrow R[i,j] = \sum_k A[i,k]\ B[k,j]$

```
>>> A = np.array([[1,1],[0,1]]); B = np.array([[2,0],[3,4]])
>>> A*B                 # produit terme à terme
array([[2, 0],
       [0, 4]])
>>> np.dot(A,B)         # produit matriciel
array([[5, 4],
       [3, 4]])
>>> a, b = np.array([1,2,3]), np.array([0,1,0]) # 2 vectors
>>> np.dot(a,b)
2
```

- Produit scalaire de 2 vecteurs :

```
>>> a, b = np.array([1,2,3]), np.array([0,1,0])
>>> np.vdot(a, b)
2
```

Algébre linéaire avec numpy et le module numpy.linalg

- Matrices diagonales :

```
>>> np.diag(np.arange(3))
array([[0, 0, 0],
       [0, 1, 0],
       [0, 0, 2]])
>>> np.diag(np.arange(1,3),1)
array([[0, 1, 0],
       [0, 0, 2],
       [0, 0, 0]])
>>> np.diag(np.arange(1,3),-1)
array([[0, 0, 0],
       [1, 0, 0],
       [0, 2, 0]])
```

Algébre linéaire avec numpy et le module numpy.linalg

- importation de tout numpy dans l'espace de nom courant :

```
>>> from numpy import *
>>> from numpy.linalg import *
>>> m = random.random(4).reshape((2,2)); m
array([[ 0.57401918,  0.64990241],
       [ 0.02683847,  0.01328225]])
>>> det(m)
-0.00981811548021
>>> m.transpose() # ne modifie pas m
array([[ 0.57401918,  0.02683847],
       [ 0.64990241,  0.01328225]])
>>> mi = inv(m); mi
array([[ -1.35283131  66.19421103]
       [  2.73356598 -58.46531103]])
>>> residu = dot(m, mi) - identity(2); residu
array([[  0.00000000e+00  -7.10542736e-15]
       [  0.00000000e+00  -1.11022302e-16]])
>>> norm(residu)
7.1062946664058918e-15
```

Algébre linéaire avec numpy et le module numpy.linalg

- importation de numpy et numpy.linalg avec des alias :

```
>>> import numpy as np
>>> import numpy.linalg as npl
>>> m = np.random.random(4).reshape((2,2)); m
array([[ 0.29983518,  0.24003911],
       [ 0.63791418,  0.97157407]])
>>> npl.det(m)
0.138187733609
>>> m.transpose()
array([[ 0.29983518,  0.63791418],
       [ 0.24003911,  0.97157407]])
>>> mi = npl.inv(m); mi
array([[ 7.03082713 -1.73705074]
       [-4.6162866   2.16976696]]
>>> residu = np.dot(m, mi) - np.identity(2); residu
array([[  4.44089210e-16   0.00000000e+00]
       [  0.00000000e+00   0.00000000e+00]])
>>> npl.norm(residu)
4.4408920985006262e-16
```

Algébre linéaire avec numpy et le module numpy.linalg

- Algébre linéaire avec numpy :

```
>>> import numpy as np
>>> import numpy.linalg as npl
>>> m = np.random.random(9).reshape((3,3)); m
array([[ 0.73377208,  0.26787043,  0.63561671],
       [ 0.9495004 ,  0.73684802,  0.01673223],
       [ 0.08534191,  0.77328228,  0.700254  ]])
>>> y = np.random.random(3); y
array([ 0.92367858,  0.32060105,  0.64198517])
>>> x = npl.solve(m, y); x
array([ 0.42757753, -0.13899785,  1.01817263])
>>> np.dot(m, x)
array([ 0.92367858,  0.32060105,  0.64198517])
>>> np.dot(m, x) - y
array([  1.11022302e-16,   0.00000000e+00,   0.00000000e+00])
```

Algébre linéaire avec numpy et le module numpy.linalg

- Valeurs propres, vecteurs propres :

```
>>> npl.eigvals(m)
array([ 1.63893416+0.j , 0.26596997+0.5535386j, 0.26596997-0.5535386j])
>>> m = np.random.random(9).reshape((3,3)); m
array([[ 0.83998644,  0.24385328,  0.5285008 ],
       [ 0.79324559,  0.42156439,  0.67233731],
       [ 0.06364909,  0.97863566,  0.80485252]])
>>> vvp = eig(m)
>>> vvp[0]
array([-0.03068944,  0.30647658,  1.7906162 ])
>>> vvp[1]
array([[-0.27711595, -0.5789238 ,  0.5012003 ],
       [-0.61339946, -0.33980812,  0.59770115],
       [ 0.73955923,  0.74120016,  0.62574084]])
>>> v0, v1, v2 = vvp[1][:,0], vvp[1][:,1], vvp[1][:,2]
>>> dot(m, v0) - vvp[0][0]*v0
array([ -2.08166817e-17,   4.51028104e-17,  -4.16333634e-17])
>>> dot(m, v1) - vvp[0][1]*v1
array([  1.94289029e-16,   8.32667268e-17,  -1.66533454e-16])
>>> dot(m, v2) - vvp[0][2]*v2
array([ -6.66133815e-16,  -2.22044605e-16,   0.00000000e+00])
```

Générateurs aléatoires avec numpy.random

- La doc en ligne du module numpy.random est disponible sur http://docs.scipy.org/doc/numpy/reference/routines.random.html
- Exemples de générateurs aléatoires uniformes :
  - np.random.rand tirage uniforme continu dans [0,1[
  - np.random.random tirage uniforme continu dans [0,1[
  - np.random.randint tirage uniforme discret dans [a, b[
  - np.random.random_integers tirage uniforme discret dans [a, b]
  - np.random.randn tirage gaussien dans [0,1[
- Générateurs aléatoires suivant des distributions classiques
  - vaste catalogue (beta, binomial, chisquare, dirichlet, gamma...)

Générateurs aléatoires avec numpy.random

- Générateurs aléatoires (loi uniforme) :

```
>>> import numpy.random as npr
>>> npr.rand(3,2)    # matrice 3X2, tirages uniformes dans [0,1[
array([[ 0.14022471,  0.96360618],
       [ 0.37601032,  0.25528411],
       [ 0.49313049,  0.94909878]])
>>> np.random.randint(5,10, size=10)
array([6, 6, 8, 6, 6, 6, 5, 9, 7, 5])
>>> np.random.randint(5, size=(2, 4)) # tuple pour donner la dimension
array([[4, 0, 2, 4],
       [3, 3, 0, 3]])
>>> np.random.random_integers(1,5,10)# 10 values in [1,5]
array([2, 2, 3, 4, 4, 1, 2, 2, 3, 3])
>>> npr.random()
0.4710854799535609 8
>>> npr.random((5,))   # tuple pour donner la dimension (shape)
array([ 0.30220482,  0.86820401,  0.1654503 ,  0.11659149,  0.54323428])
>>> 5 * npr.random((3, 2)) - 5        # 3 X 2 array of random reals
array([[-3.99149989, -0.52338984],   # in [-5, 0[
       [-2.99091858, -0.79479508],
       [-1.23204345, -1.75224494]])
```

Générateurs aléatoires avec numpy.random

- Générateurs aléatoires (loi normale) :

```
>>> np.random.rand(3,2) # matrice 3X2, tirages uniformes dans [0,1]
array([[ 0.14022471,  0.96360618],
       [ 0.37601032,  0.25528411],
       [ 0.49313049,  0.94909878]])
>>> np.random.random_sample()
0.47108547995356098
>>> type(np.random.random_sample())
<class 'float'>
>>> np.random.random_sample((5,))# tuple pour donner la dimension (shape)
array([ 0.30220482,  0.86820401,  0.1654503 ,  0.11659149,  0.54323428])
>>> 5 * np.random.random_sample((3, 2)) - 5  # 3 X 2 array of random reals
array([[-3.99149989, -0.52338984],          #in [-5, 0]
       [-2.99091858, -0.79479508],
       [-1.23204345, -1.75224494]])
```

Générateurs aléatoires avec numpy.random

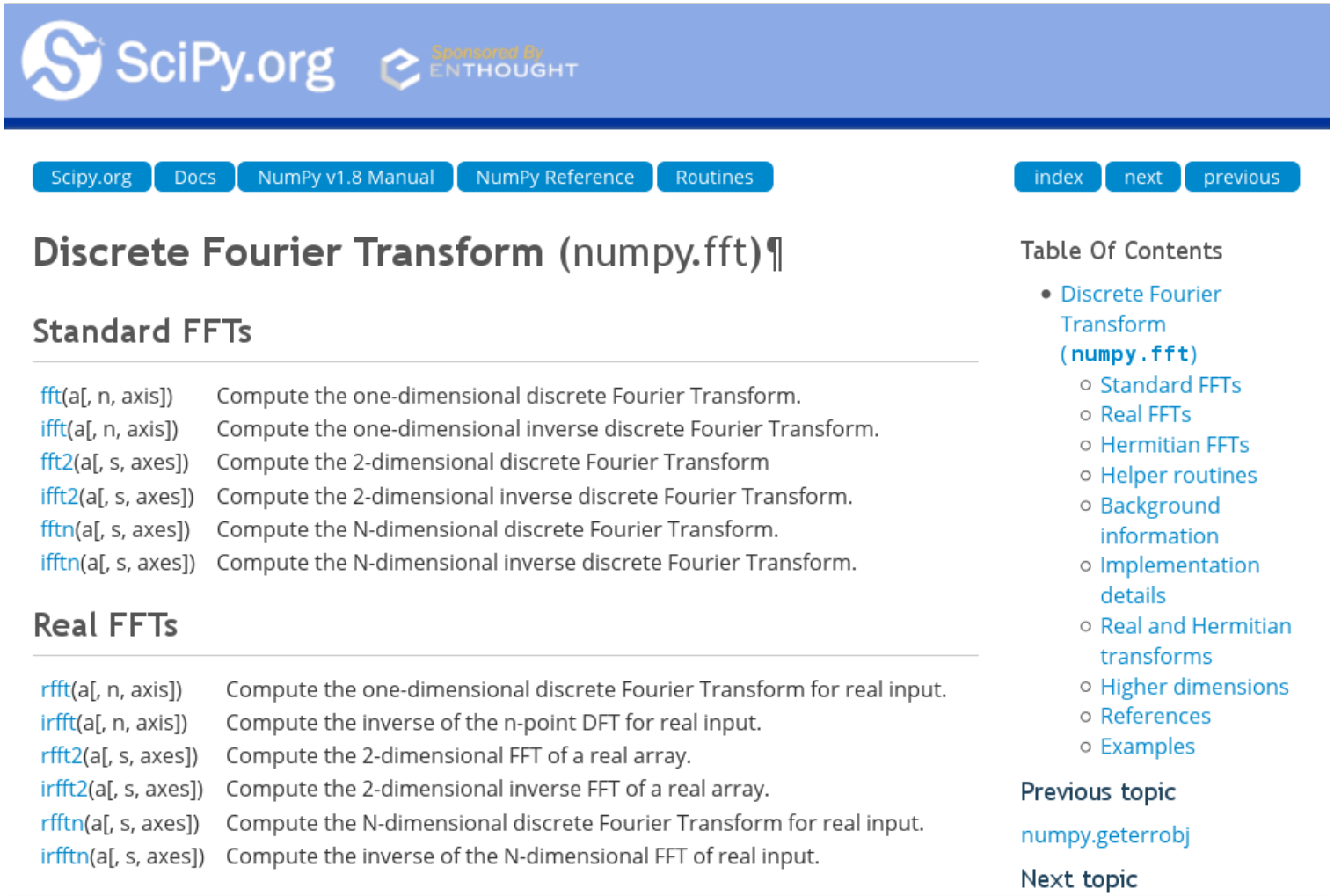
- Vaste catalogue de générateurs aléatoires disponible sur
  docs.scipy.org/doc/numpy/reference/routines.random.html#distributions

Distributions

beta(a, b[, size])	The Beta distribution over `[0, 1]`.
binomial(n, p[, size])	Draw samples from a binomial distribution.
chisquare(df[, size])	Draw samples from a chi-square distribution.
dirichlet(alpha[, size])	Draw samples from the Dirichlet distribution.
exponential([scale, size])	Exponential distribution.
f(dfnum, dfden[, size])	Draw samples from a F distribution.
gamma(shape[, scale, size])	Draw samples from a Gamma distribution.
geometric(p[, size])	Draw samples from the geometric distribution.
gumbel([loc, scale, size])	Gumbel distribution.
hypergeometric(ngood, nbad, nsample[, size])	Draw samples from a Hypergeometric distribution.
laplace([loc, scale, size])	Draw samples from the Laplace or double exponential distribution with
logistic([loc, scale, size])	Draw samples from a Logistic distribution.
lognormal([mean, sigma, size])	Return samples drawn from a log-normal distribution.
logseries(p[, size])	Draw samples from a Logarithmic Series distribution.
multinomial(n, pvals[, size])	Draw samples from a multinomial distribution.
multivariate_normal(mean, cov[, size])	Draw random samples from a multivariate normal distribution.
negative_binomial(n, p[, size])	Draw samples from a negative_binomial distribution.
noncentral_chisquare(df, nonc[, size])	Draw samples from a noncentral chi-square distribution.
noncentral_f(dfnum, dfden, nonc[, size])	Draw samples from the noncentral F distribution.
normal([loc, scale, size])	Draw random samples from a normal (Gaussian) distribution.
pareto(a[, size])	Draw samples from a Pareto II or Lomax distribution with specified shape.
poisson([lam, size])	Draw samples from a Poisson distribution.
power(a[, size])	Draws samples in [0, 1] from a power distribution with positive exponent a - 1.
rayleigh([scale, size])	Draw samples from a Rayleigh distribution.

Calculs FFT avec numpy.fft

- La doc en ligne est disponible sur
  http://docs.scipy.org/doc/numpy/reference/routines.fft.html



SciPy.org Sponsored By ENTHOUGHT

Scipy.org | Docs | NumPy v1.8 Manual | NumPy Reference | Routines

index | next | previous

Discrete Fourier Transform (numpy.fft)¶

Standard FFTs

fft(a[, n, axis])	Compute the one-dimensional discrete Fourier Transform.
ifft(a[, n, axis])	Compute the one-dimensional inverse discrete Fourier Transform.
fft2(a[, s, axes])	Compute the 2-dimensional discrete Fourier Transform
ifft2(a[, s, axes])	Compute the 2-dimensional inverse discrete Fourier Transform.
fftn(a[, s, axes])	Compute the N-dimensional discrete Fourier Transform.
ifftn(a[, s, axes])	Compute the N-dimensional inverse discrete Fourier Transform.

Real FFTs

rfft(a[, n, axis])	Compute the one-dimensional discrete Fourier Transform for real input.
irfft(a[, n, axis])	Compute the inverse of the n-point DFT for real input.
rfft2(a[, s, axes])	Compute the 2-dimensional FFT of a real array.
irfft2(a[, s, axes])	Compute the 2-dimensional inverse FFT of a real array.
rfftn(a[, s, axes])	Compute the N-dimensional discrete Fourier Transform for real input.
irfftn(a[, s, axes])	Compute the inverse of the N-dimensional FFT of real input.

Table Of Contents

- Discrete Fourier Transform (numpy.fft)
  - Standard FFTs
  - Real FFTs
  - Hermitian FFTs
  - Helper routines
  - Background information
  - Implementation details
  - Real and Hermitian transforms
  - Higher dimensions
  - References
  - Examples

Previous topic

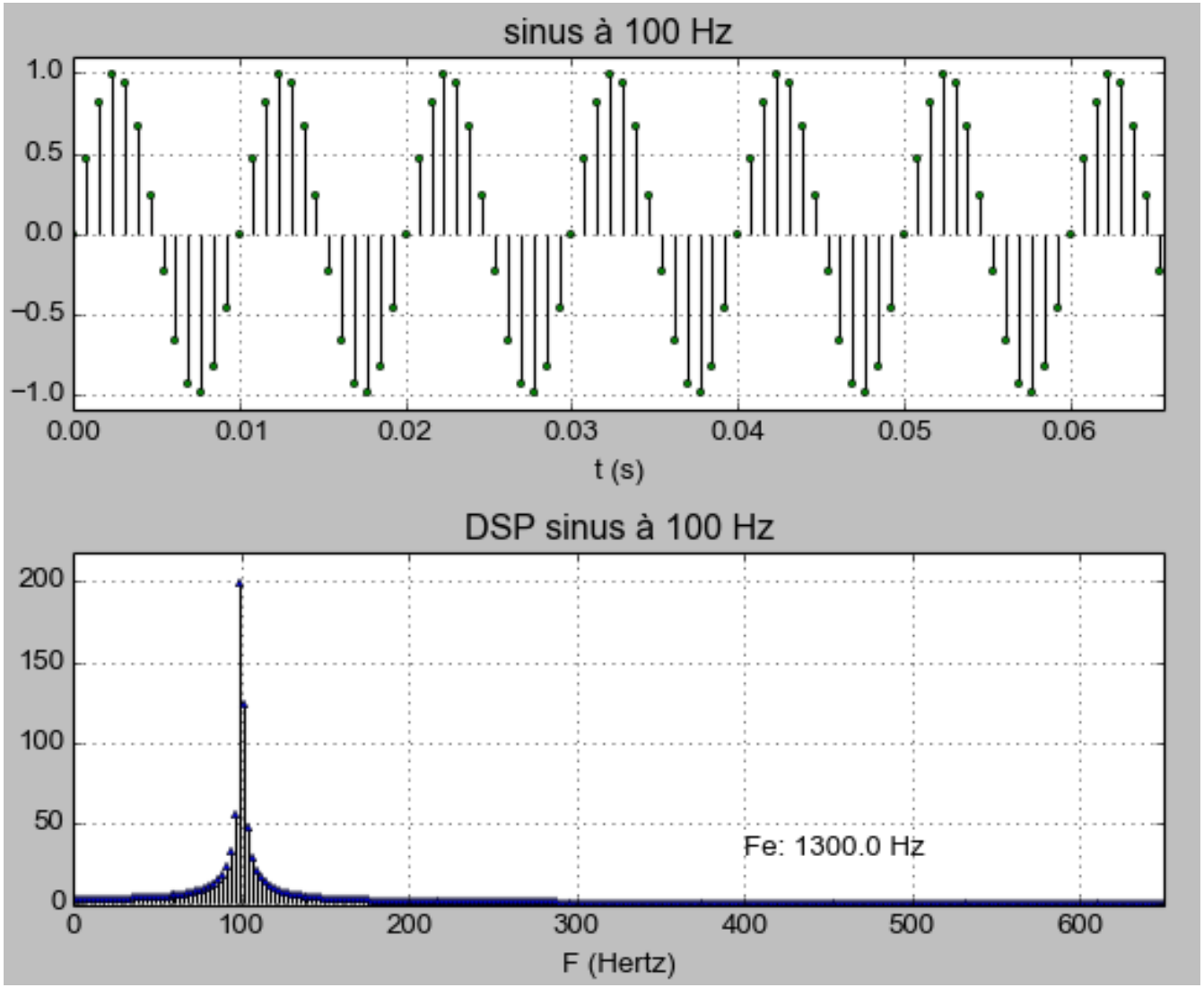
numpy.geterrobj

Next topic

Calculs de FFT avec numpy.fft [fft_sin100.py]

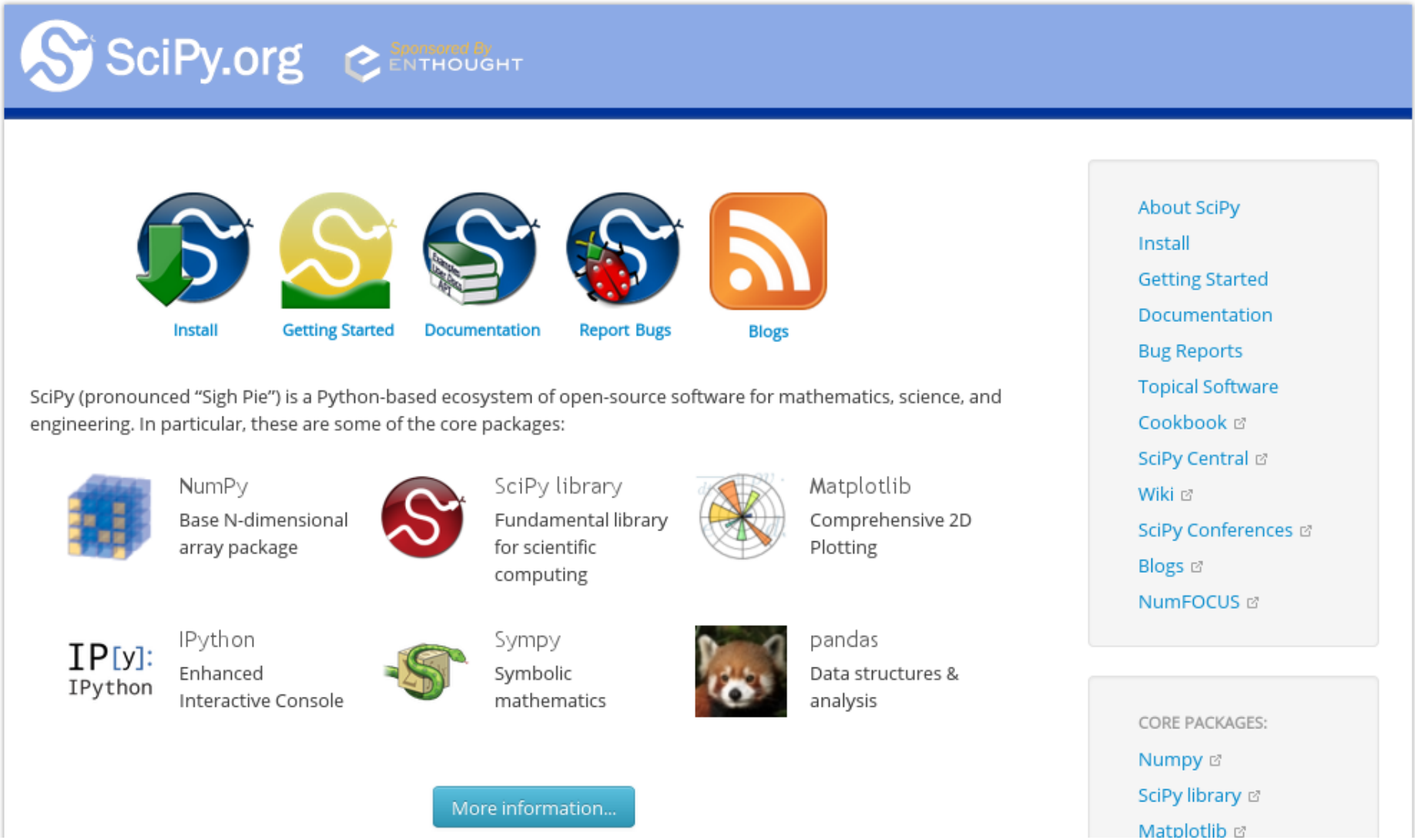
```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

N, F0 = 512, 100        # N points, 100. Hertz
Fe = 13.*F0             # Fréquence échantillonnage
Te, dF = 1./Fe, Fe/N    # période éch., pas en fréquence
vT = np.arange(N)*Te    # vecteur temps
# échantillonnage du sinus et FFT :
Se  = np.sin(2*np.pi*F0*vT)
TF_Se = np.fft.rfft(Se)
N2 = len(TF_Se); vF = np.arange(N2)*dF
plt.subplots_adjust(hspace=0.4)
plt.subplot(211)
plt.title('sinus à 100 Hz'); plt.xlabel('t (s)'); plt.grid()
plt.plot(vT, Se, 'og', markersize=3)
plt.vlines(vT, [0], Se)
plt.axis([0, N/6*Te, -1.1, 1.1])
plt.subplot(212)
plt.title('DSP sinus à 100 Hz'); plt.xlabel('F (Hertz)'); plt.grid()
plt.plot(vF, abs(TF_Se), '^b', markersize=3)
plt.vlines(vF, [0], abs(TF_Se))
plt.axis([0, Fe/2, -1, 1.1*max(abs(TF_Se))])
plt.text(400, 30, "Fe: {} Hz".format(Fe))
plt.show()
```

Calculs de fft avec numpy.fft



Le module scipy

http://www.scipy.org



Le module Scipy

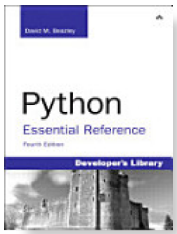
- Tutoriel complet : docs.scipy.org/doc/scipy/reference/tutorial/index.html

Références bibliographiques

http://docs.python.org/index.html

fr.openclassrooms.com/informatique/cours/apprenez-a-programmer-en-python

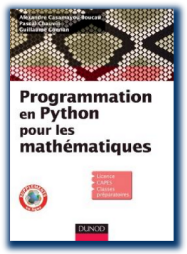
Apprenez à programmer en Python
Vincent Le Goff
Simple IT éd. (Le livre du zéro)
≈25 €



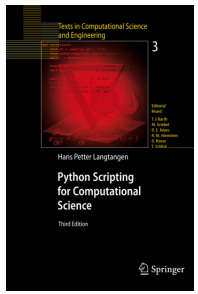
Python Essential Reference
David M. Beazley
Addison Wesley

Matplotlib for Python Developers
Sandro Tosi
PACTK publishing

Apprendre à programmer avec Python 3
Gérard Swinnen
Télécharger le PDF



Programmation en Python pour les mathématiques
A. Casamayou-Boucau
Dunod



Python Scripting for Computational Science
T.J. Barth
Springer

✉jean-luc.Charles@ensam.eu
✉eric.Ducasse@ensam.eu